
BACHELORARBEIT

Herr
Philipp Kempe

**Entwicklung eines
Batteriemanagements zur ver-
einfachten Lebensdauerprüfung
von Blei-Säure-Batterien**

Mittweida, 2012

BACHELORARBEIT

Entwicklung eines Batteriemanagements zur ver- einfachten Lebensdauerprüfung von Blei-Säure-Batterien

Autor:

Herr

Philipp Kempe

Studiengang:

Mechatronik

Seminargruppe:

ME08w1B

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. Norman Winkler

Einreichung:

Mittweida, 01.03.2012

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2012

Bibliografische Beschreibung:

Kempe, Philipp:

Entwicklung eines

Batteriemanagements zur vereinfachten Lebensdauerprüfung

von Blei-Säure-Batterien. - 2012. - 5, 33, 11 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Maschinenbau>, Bachelorarbeit, 2012

Referat:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Problemen, die bei der aufwendigen Lebensdauerprüfung von Blei-Säure-Batterie auftreten. Nachdem die Möglichkeiten einer Vereinfachung aufgezeigt wurden, erfolgt eine Ausarbeitung des Funktionsumfangs. Weiterhin werden Lösungen bei der Umsetzung der Funktionen aufgezeigt, insbesondere die Messung des Säurepotentials mit einem Cadmiumstab. Mit dem Funktionsmuster wurden bei einem abschließenden Testzyklus die Funktionen überprüft und bewertet.

Danksagung:

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt meinen beiden Korrektoren. Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß, der immer ein offenes Ohr hatte und mich bei meiner Bachelorarbeit unterstützte. Sowie Dipl.-Ing. Norman Winkler dem ich für das Thema selbst danke, und dass er mir als Ansprechpartner während der gesamten Zeit zur Verfügung stand. Mit seinem technischen Know-How und hilfreichen Anregungen fand ich stets wertvolle Unterstützung.

Des weiteren möchte ich mich bei Herrn Gerhard Lehmann und Dipl.-Ing. Klaus Rupprecht bedanken, die mich im Rahmen meiner Bachelorarbeit bei der Firma Hoppecke eingestellt und mir diese Arbeit somit ermöglicht haben.

Danken möchte ich weiterhin allen Kollegen der Hoppecke ABT die mir die komplette Zeit mit gutem Rat beiseite standen und mir vieles erleichtert haben.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir dieses Studium erst ermöglicht, mich die komplette Zeit unterstützt haben.

Bedanken möchte ich mich auch bei Dipl.-Ing. Arnd Kempe für das Aufspüren einiger sprachlicher und logischer Unstimmigkeiten. Derselbe Dank gilt meinen Cousins Hanna Kempe und Karolin Richter, weiterhin Elias Scharf die mit geschultem Auge die gesamte Arbeit durchgegangen sind und zahlreiche sprachliche Fehler aufgedeckt haben.

Inhalt

| | |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | 3 |
| Tabellenverzeichnis | 4 |
| Abkürzungsverzeichnis | 5 |
| 1 Einleitung..... | 6 |
| 1.1 <i>Firmenportrait Hoppecke</i> | 6 |
| 1.2 <i>Aufgabenstellung.....</i> | 7 |
| 2 Stand der Technik | 8 |
| 2.1 <i>Allgemeines zur Blei-Säure-Batterie</i> | 8 |
| 2.1.1 <i>Aufbau des Bleiakkumulators</i> | 8 |
| 2.1.2 <i>Chemische Reaktion</i> | 8 |
| 2.1.3 <i>Bedeutung im 21. Jahrhundert</i> | 8 |
| 2.2 <i>Die Prüfung von Zellen.....</i> | 9 |
| 2.3 <i>Aufbau im Prüflabor.....</i> | 9 |
| 2.4 <i>Ablauf eines Lebensdauertests</i> | 10 |
| 2.5 <i>Messung des Säurepotentials</i> | 11 |
| 2.6 <i>Aufgabe des Prüfgerätes.....</i> | 12 |
| 2.7 <i>Marktsituation.....</i> | 12 |
| 3 Anforderungsanalyse..... | 13 |
| 3.1 <i>Anforderungsparameter und deren Wichtung</i> | 13 |
| 3.2 <i>Schaltprinzip.....</i> | 16 |
| 4 Umsetzung des Prüfsystems..... | 17 |
| 4.1 <i>Spannungsversorgung</i> | 17 |
| 4.1.1 <i>Anforderungen</i> | 17 |
| 4.1.2 <i>Elektronik</i> | 17 |
| 4.2 <i>Heben und Senken des Cadmiumstabs</i> | 19 |
| 4.2.1 <i>Anforderung</i> | 19 |
| 4.2.2 <i>Ansteuerung und Versorgung.....</i> | 20 |
| 4.2.3 <i>Mechanik.....</i> | 21 |
| 4.2.4 <i>Software</i> | 22 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3 | <i>Leistungsschalter</i> | 23 |
| 4.3.1 | Anforderungen | 23 |
| 4.3.2 | Auswahl von Schaltervarianten | 23 |
| 4.3.2.1 | Vergleich der Halbleiterschalter | 24 |
| 4.3.2.2 | Berechnung der Verlustleistung an allen MOSFETs | 26 |
| 4.3.3 | Auslegung der Kühlung | 27 |
| 4.4 | <i>Stromschienen</i> | 28 |
| 4.4.1 | Anforderungen | 28 |
| 4.4.2 | Mechanik..... | 28 |
| 4.4.3 | Elektronik | 29 |
| 4.4.4 | Aufteilung der Platinen | 29 |
| 5 | Bewertung der Ergebnisse | 30 |
| 5.1 | <i>Verlauf der Endabnahme</i> | 30 |
| 5.2 | <i>Test der realisierten Funktionen</i> | 32 |
| 5.3 | <i>Test eines kompletten Zyklus</i> | 33 |
| 5.4 | <i>Test mit Maximalstrom</i> | 34 |
| 6 | Zusammenfassung | 35 |
| 7 | Ausblick | 36 |
| 7.1 | <i>Reihenschaltung der Zellen</i> | 36 |
| 7.2 | <i>Vorschlag zur Verbesserung der Kühlung</i> | 36 |
| 7.3 | <i>Dichtheit des Gehäuses</i> | 37 |
| 7.4 | <i>Antriebsalternative für die Hubmechanik</i> | 37 |
| 7.5 | <i>Datenverbindung</i> | 38 |
| 7.6 | <i>Weiterentwicklung und Abmessungen des Gehäuses</i> | 38 |
| | Literaturverzeichnis | 39 |
| | Anlagen | 40 |
| | Selbstständigkeitserklärung | 49 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Prüfen von Einzelzellspannungen im Labor der Fa. Hoppecke | 9 |
| Abbildung 2: Reihenschaltung der Zellen mit dem Prüfstand..... | 10 |
| Abbildung 3: Spannungsverlauf einer Bleizelle bei der Entladung | 11 |
| Abbildung 4: Schaltprinzip | 16 |
| Abbildung 5: Aufbau der Spannungsversorgung | 18 |
| Abbildung 6: Detaildarstellung der Bleizelle mit eingeführtem Cadmiumstab [5]..... | 19 |
| Abbildung 7: Versorgungsspannung bei Servodrehung..... | 20 |
| Abbildung 8: Getriebe zum Heben und Senken des Cadmiumstabs..... | 21 |
| Abbildung 9: PWM-Signal für Servo Rechtsanschlag | 22 |
| Abbildung 10: PWM-Signal für Servo Linksanschlag | 22 |
| Abbildung 11: Verlustleistung MOSFET | 24 |
| Abbildung 12: Verlustleistung IGBT | 24 |
| Abbildung 13: Vergleich von MOSFET und IGBT | 24 |
| Abbildung 14: Schaltung zur Ansteuerung der FETs | 26 |
| Abbildung 15: Konzept zur Kühlung laut Datenblatt [7]..... | 27 |
| Abbildung 16: Wärmeleitung innerhalb des Moduls..... | 27 |
| Abbildung 17: Lötverbindung der FETs auf der Powerplatine | 29 |
| Abbildung 18: Funktionsmuster | 30 |
| Abbildung 19: Messaufbau zur Endabnahme | 31 |
| Abbildung 20: Spannungs-, Stromverläufe des Messzyklus | 33 |
| Abbildung 21: Wärmeverteilung bei Maximalstrom..... | 34 |
| Abbildung 22: Wärmeleitung mit Aluminiumkern-Platine | 36 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Anforderungsanalyse, Funktionsanforderungen | 14 |
| Tabelle 2: qualitative Anforderungen | 15 |
| Tabelle 3: Test der Funktionen | 32 |

Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Bezeichnung |
|------------------|---|
| BR | Brücke |
| F | Funktion |
| FA | Funktionsanforderung |
| FET | Feldeffekttransistor |
| IGBT | Insulated-Gate Bipolar Transistor |
| IMS | Insulated Metal Substrate |
| IrDA | Infrared Data Association |
| i.O. | in Ordnung |
| LESY | Lifecycle-Estimation-Supply |
| MOSFET | Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor |
| Prio | Priorität |
| PWM | Pulsweitenmodulation |
| QA | qualitative Anforderung |
| SMD | Surface-Mounted Device |
| SPI | Service Provider Interface |
| TTL | Transistor-Transistor-Logik |
| UART | Universal Asynchronous Receiver Transmitter |

1 Einleitung

Während meines dreimonatigen Praktikums bei Hoppecke in Zwickau haben mich die Zusammenarbeit innerhalb der Firma und die Aufgabenkomplexe sehr angesprochen. Es fiel mir daher nicht schwer, meine Bachelorarbeit ebenfalls in Zwickau bei der Hoppecke ABT anzufertigen. Nach Rücksprache mit der Firmenleitung und Suche eines geeigneten Betreuers konnte eine interessante Aufgabenstellung formuliert werden. Die Ausschreibung ist unter Punkt 1.2 zu finden.

1.1 Firmenportrait Hoppecke

Hoppecke ist der größte Hersteller für Industriebatteriesysteme in europäischer Hand. Seit 1927 werden Produkte „Made in Germany“ produziert und entwickelt. Dank führender Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, sind zu allen bewährten und innovativen Speichertechnologien der Branche Produkte im Portfolio der Firma. Für Kunden in aller Welt werden Komplettlösungen für eine effiziente, zuverlässige und nachhaltige Energieversorgung angeboten. Dabei werden die Bereiche Energieversorgung für emissionsfreie Antriebe, abgesicherte Stromversorgung sowie Speicherung regenerativer Energien abgedeckt [1]. Die HOPPECKE Advanced Battery Technology GmbH (ABT), mit dem Standort in Zwickau, entwickelt innovative elektrochemische Energiespeicher sowie elektronische Komponenten zur Überwachung und Realisierung von Energiespeicherlösungen [2].

1.2 Aufgabenstellung

Im Rahmen unserer Nachwuchsförderung vergeben wir in unserer Tochtergesellschaft in Zwickau an einen qualifizierten Studenten (m/w) eine

Abschlussarbeit

zum Thema

Entwicklung eines Batteriemanagements zur vereinfachten Lebensdauerprüfung von Blei-Säure-Batterien

Die erreichbare Lebensdauer und Zyklenfestigkeit von Blei-Säure-Batterien ist von großer Bedeutung hinsichtlich Performanz, Betriebssicherheit und Kosteneffizienz der Energiespeicher. Daher werden im physikalischen Labor von HOPPECKE aufwendige Lebensdaueruntersuchungen von Batteriesystemen durchgeführt. Die dabei notwendige Aufnahme verschiedener Messgrößen führt zu einem komplexen Messaufbau, der bei jeder Kapazitätsprüfung angepasst werden muss.

Um diesen Vorgang zu automatisieren, ist im Rahmen einer praxisorientierten Abschlussarbeit (i. d. R. 6 Monate) ein einzelzellbasiertes Batteriemanagement zu entwerfen, das eine Optimierung dieser Prüfung ermöglicht. Dies beinhaltet zunächst eine Anforderungsanalyse und Literaturrecherche, den Schaltungsentwurf und Layoutgestaltung, sowie das Gehäusedesign, den Aufbau und die Inbetriebnahme der ersten Prototypen.

Als Student/in eines Studiums der Fachrichtung Elektrotechnik oder Mechatronik haben Sie bereits praktische Erfahrungen beispielsweise als Praktikant gesammelt. Sie verfügen über Grundlagenkenntnisse in der Leistungselektronik, im Schaltungsentwurf und Embedded Systems/Steuergeräteentwicklung. Persönlich zeichnen Sie sich durch eine selbständige und flexible Arbeitsweise sowie eine hohe Eigeninitiative und Kreativität aus.

Falls Sie sich für dieses anspruchsvolle Aufgabengebiet mit vielfältigen Perspektiven für Ihre fachliche und persönliche Weiterentwicklung interessieren, so richten Sie Ihre aussagekräftige Bewerbung bitte an Mirja Große-Nobis, Tel.: 02963 61-548 / mirja.grosse-nobis@hoppecke.com.

HOPPECKE Batterien GmbH & Co. KG

Personalmanagement - Bontkirchener Str. 1 - 59929 Brilon-Hoppecke
www.HOPPECKE.com

2 Stand der Technik

2.1 Allgemeines zur Blei-Säure-Batterie

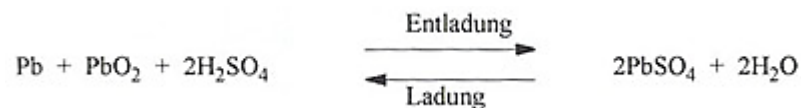
2.1.1 Aufbau des Bleiakкумуляtors

Die klassische Bleibatterie besteht aus Bleioxid (PbO_2) in der positiven Elektrode, Blei (Pb) in der negativen Elektrode und als Elektrolyt Schwefelsäure gelöst im Wasser. Aufgrund der niedrigen Wasserzersetzungsspannung des Wassers und einer wesentlich höheren Ruhespannung der Batterie ist ein ständiger Zerfallsprozess des Wassers in der Batterie vorhanden.

Die relativ leichte Anpassbarkeit des Systems an das Anwendungsprofil führte über die Entwicklungsjahre zu einer Vielzahl unterschiedlicher Batteriekonstruktionen mit unterschiedlichsten Elektrodenarten sowohl als geschlossene als auch als verschlossene Batterie [3].

2.1.2 Chemische Reaktion

Die folgende Gleichung zeigt die chemischen Reaktionen als sogenannte Gesamtreaktion für die Entladung und Ladung:



Während der Entladung wird das Blei der negativen Elektrode (aktive Masse) ebenso wie das Bleidioxid der positiven Elektrode in Bleisulfat umgewandelt. Die Schwefelsäure ist daran in Form von Sulfat-Ionen beteiligt. Das entstehende Wasser zeigt an, dass sie sich dabei verbraucht und verdünnt. Die Dichte der Schwefelsäure sinkt. Beim Laden laufen die Prozesse in umgekehrter Richtung ab [3].

2.1.3 Bedeutung im 21. Jahrhundert

Aufgrund der ausgereiften Technologie und der weitgefächerten Anwendungsgebiete kommt der Bleibatterie eine große wirtschaftliche Bedeutung zu. Die zunehmende Mobilität benötigt passende Energiespeicher. Das, oft als Nachteil angesehene hohe Gewicht, stellt bei Anwendungen von Flurförderfahrzeugen sogar einen Vorteil dar. Durch den hohen Verbreitungsgrad und die großtechnische Fertigung wird eine kosteneffiziente Fertigung möglich. Eine gute Recycelbarkeit spricht ebenfalls für die Verwendung der Bleibatterie.

2.2 Die Prüfung von Zellen

Im physikalischen Labor in der Firmenzentrale von Hoppecke werden Stichproben aus der aktuellen Produktion von Bleizellen entnommen. Zur Qualitätssicherung führen Mitarbeiter verschiedene Tests an Bleibatterien durch. Auch Zellen aus der Entwicklung werden getestet, um zum Beispiel eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Zellen und der Anpassung an spezielle Einsatzfelder zu erreichen. Ein wichtiger Test ist die Lebensdauerprüfung, um die Zyklenfestigkeit zu ermitteln. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit dieser Prüfung.

2.3 Aufbau im Prüflabor

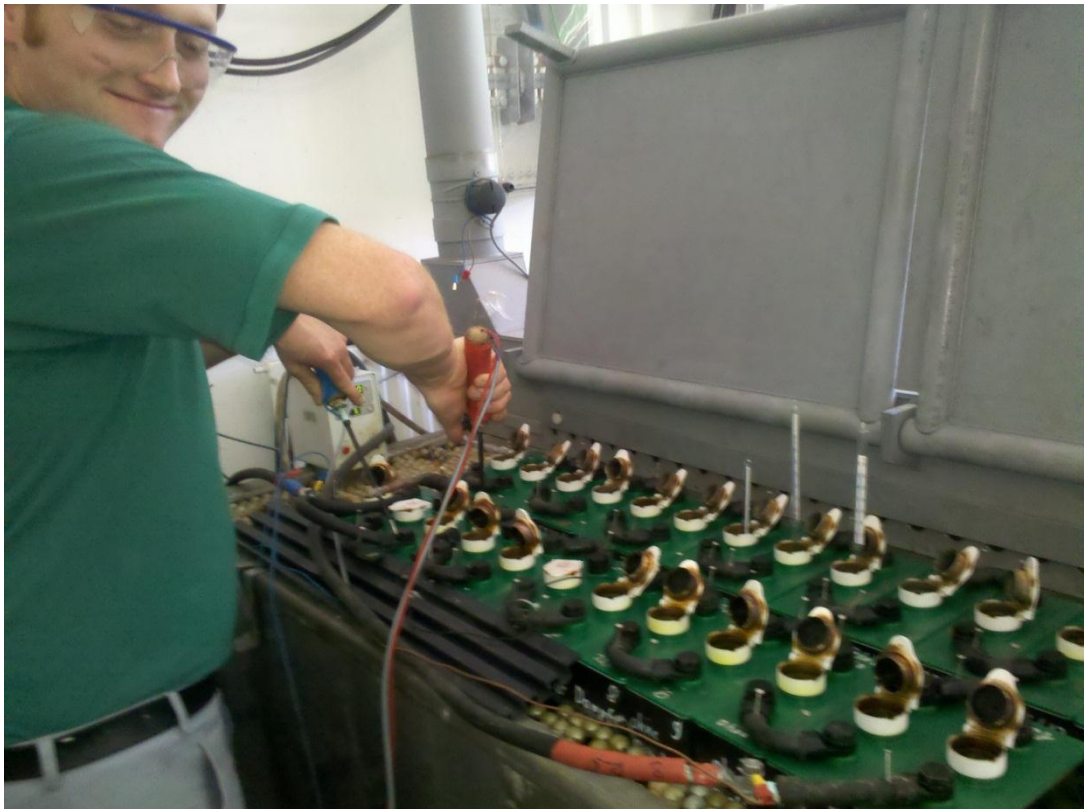


Abbildung 1: Prüfen von Einzelzellspannungen im Labor der Fa. Hoppecke

Werden die Zellen mit hohen Strömen beaufschlagt, erwärmen sie sich. Dies hat wiederum Einfluss auf das Messergebnis und muss vermieden werden. Deshalb stehen die zu prüfenden Zellen in einem Wasserbad, um eine konstante Temperatur während der Prüfung zu gewährleisten.

Es werden mehrere Zellen zu einer Batterie verschaltet. Diese wird mit einem Messkanal des Prüfstandes verbunden, wie in Abbildung 2 dargestellt.

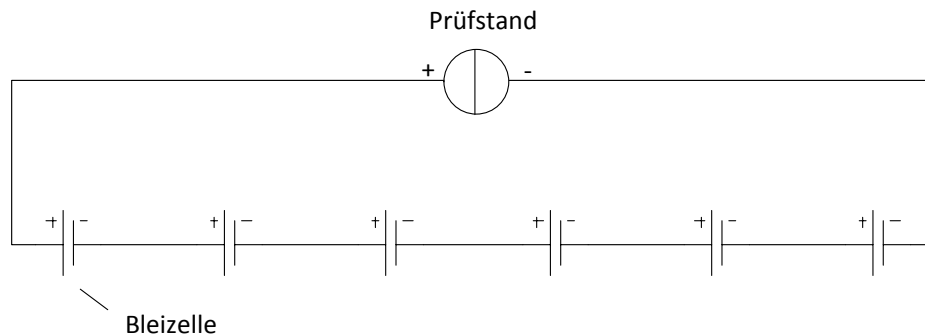


Abbildung 2: Reihenschaltung der Zellen mit dem Prüfstand

2.4 Ablauf eines Lebensdauertests

Folgende Schritte werden bei der Lebensdauerprüfung¹ durchgeführt: Die Zellen werden auf ca. 70 % ihrer Nennkapazität² geladen und anschließend wieder auf 30 % entladen. Diese Belastungs-Zyklen laufen bis zu 50-mal hintereinander ab. Daran schließt sich die Kapazitätsmessung an. Begonnen wird mit einer Vollladung bis zur Ladeschlussspannung von 2,3 V. Danach folgt die Entladung mit Kapazitätsmessung bis zur Entladeschlussspannung von 1,6 V, dies ist in Abbildung 3 dargestellt.

Die Zellen, die in Reihe verschaltet sind, weisen immer eine unterschiedliche Kapazität auf. Diese kann durch Fertigungstoleranzen schwanken und wird durch die Vorgeschichte der Zelle beeinflusst. Im Extremfall könnten es auch Zellen mit unterschiedlicher Nennkapazität sein.

Die Zelle mit der geringsten Kapazität erreicht als erste die Entladeschlussspannung und darf nicht weiter entladen werden. Um eine Zerstörung zu vermeiden, muss diese aus der Reihenschaltung genommen werden. Die anderen Zellen werden wieder in Reihe mit dem Prüfstand verbunden und weiter entladen, um auch deren Kapazität zu ermitteln. Somit muss eine Bleizelle nach der anderen, die die Entladeschlussspannung erreicht hat, herausgeschaltet werden. Wenn die letzte Zelle 1,6 V erreicht, ist die Kapazitätsmessung abgeschlossen und alle Zellen werden wieder in Reihe mit dem Prüfstand verschaltet. Der Prüfstand beginnt mit der Ladung aller Zellen und es können erneut Belastungszyklen durch Laden und Entladen gefahren werden.

¹ Das Ende der Lebensdauer einer Zelle ist, laut Definition erreicht, wenn nur noch 80 % der Nennkapazität vorhanden sind.

² Energiespeichervermögen eines Akkumulators, die unter Normalbedingungen (20°C) bei Belastung mit dem Nennentladestrom bis zur Entladeschlussspannung erreicht wird. Sie wird in Amperestunden angegeben [4].

2.5 Messung des Säurepotentials

Zusätzlich zur Kapazität ist das Potential zwischen der Schwefelsäure und den Bleiplatten für eine genauere Untersuchung der Zellchemie von Bedeutung. Um diesen Parameter zu messen, wird eine Elektrode in die Säure getaucht und die Spannung gemessen, die sich zwischen ihr und einem Pol der Bleizelle einstellt. Es ist unerheblich, ob der Plus- oder Minuspol gewählt wird, da mit der bekannten Zellspannung das Potential zum anderen Pol berechnet werden kann.

Das Potential wird kurz vor Erreichen der Entladeschlussspannung gemessen, im vorliegenden Fall bei 1,7 V, wie in Abbildung 3 dargestellt ist. Die Elektrode darf sich in der Säure nicht auflösen, weil eine Verunreinigung die Messwerte der Zelle beeinflussen würden. Eine Möglichkeit ist es, einen Stab aus Quecksilber und Quecksilberoxid zu verwenden, dieser zersetzt sich nicht in der Schwefelsäure. Aus Kostengründen und wegen der einfachen Bezugsmöglichkeiten wird hier Cadmium eingesetzt. Dieses zersetzt sich langsam, eignet sich bei einer kurzen Eintauchdauer dennoch zur Messung.

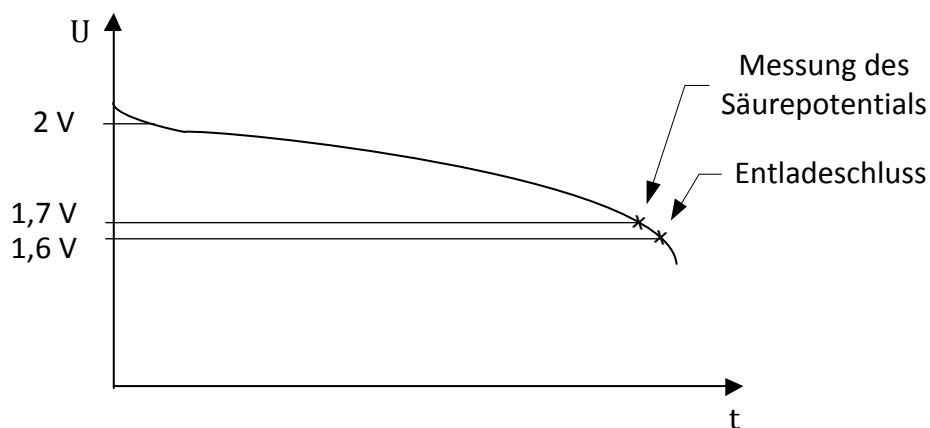


Abbildung 3: Spannungsverlauf einer Bleizelle bei der Entladung

2.6 Aufgabe des Prüfgerätes

Die oben beschriebenen Messungen laufen in der Praxis wie folgt ab: Während der Kapazitätsmessung werden die Spannungen der einzelnen Zellen von einem Mitarbeiter mit einem Multimeter nachgemessen, wie in Abbildung 1 zu sehen. Bei Erreichen von ca. 1,7 V wird ein Cadmiumstab in die Säure gehalten und ein angeschlossener Schreiber druckt die gemessene Spannung aus. Wenn eine Zelle die Entladeschlussspannung von 1,6 V unterschreitet, wird der Zellverbinder der betreffenden Zelle abgeschraubt und ein Verbinder zur Nächsten gezogen, um die Messung mit den übrigen Zellen fortzuführen. Die Spannungen werden visuell erfasst, somit ist es nicht möglich, die Spannungsgrenzen genau einzuhalten. Ebenso kann eine Messung auch auf Zeiten fallen, in denen kein Prüfer anwesend ist (z.B. am Wochenende).

Die Aufgabe von LESY³ ist es, die oben aufgeführten Messungen zu automatisieren, um die Anforderungen an die Genauigkeit einzuhalten und eine Messung ohne Stillstandszeiten zu ermöglichen.

2.7 Marktsituation

Da es sich um spezielle Anforderungen in Bezug auf Bauform, Strombelastung und Sonderfunktionen (Potentialmessung in der Säure) handelt, konnte kein Gerät gefunden werden, welches alle notwendigen Funktionen erfüllt.

Es wäre möglich, für jede Zelle einen eigenen Prüfstand zu verwenden. Von Vorteil wäre eine unabhängige Messung verschiedener Zelltypen, jedoch steht nur eine begrenzte Anzahl von Messkanälen zur Verfügung. Werden mehrere Zellen in Reihe geschaltet, wird die Lade- und Entladeschaltung des vorhandenen Prüfstandes ausgenutzt.

Die Spannungsmessung an den Einzelzellen gestaltet sich dabei schwierig, da ein gemeinsamer Bezugspunkt (Messmasse) nicht gleichzeitig an mehreren Minuspolen angeschlossen werden darf. Über diese Anschlüsse würden die Einzelzellen kurzgeschlossen. Abhilfe schafft eine 2-polige Eingangsumschaltung mit mechanischen Kontakten, bei der auch die Masse mit umgeschaltet wird. Aufgrund einer hohen Anzahl von Schaltvorgängen mit Relais kann die Zuverlässigkeit nicht garantiert werden. Eine Schaltung für eine galvanische Trennung benötigt eine Betriebsspannung, die ebenfalls galvanisch getrennt zugeführt werden muss. Aufgrund dieser Nachteile ist die Konstruktion eines speziell angepassten Gerätes notwendig, um diese Tests zu optimieren.

³ Abkürzung für Lifecycle Estimation Supply. Bedeutung in etwa: Unterstützung zum Lebensdauertest. Name des Moduls während der Entwicklung

3 Anforderungsanalyse

Um alle notwendigen und gewünschten Funktionen mit der Entwicklung von LESY abzubilden, wurde zu Beginn der Arbeit eine Anforderungsanalyse erarbeitet. Sie ist in Tabelle 1 zu sehen, und dient weiterhin zur Strukturierung der Bachelorarbeit. Die Ausarbeitung der Anforderungen erfolgte in Abstimmung mit der Leitung des Prüflabors der Firma Hoppecke in Brilon, wo LESY einsetzen werden soll.

Die Anforderungen werden nach der Notwendigkeit ihrer Erfüllung von 1 bis 3 gewichtet, wobei 1 die wichtigste und 3 die untergeordnete Bewertung darstellt. Um eine einfache Weiterentwicklung des Moduls zu ermöglichen und einen möglichst universellen Stand zu erhalten, wurden Schnittstellen zur Erweiterung bereits eingeplant und einige Vorschläge zur Realisierung angebracht.

3.1 Anforderungsparameter und deren Wichtung

Die Prio.1-Anforderungen sind unbedingt zu erfüllen um das Gerät einsetzen zu können und beinhalten hauptsächlich die Schaltfunktion.

Die Prio.2-Anforderungen sind spezielle Funktionen, welche Messungen mit dem Cadmi-umstab betreffen.

Die Prio.3-Anforderungen beinhalten zusätzliche Funktionen, wie die Kommunikation und sind als Erweiterung zu bewerten.

Die Funktionsanforderungen (FA) sind mit einer Nummer versehen um sie eindeutig zuzuordnen und in Spalte 2 benannt. Aus den Funktionsanforderungen ergeben sich dazugehörige Funktionen (F), diese werden in Spalte 4 aufgelistet.

| Anforderungen | | Funktionen | |
|---------------|--|------------|---|
| lfd. Nr. | Beschreibung | lfd. Nr. | Beschreibung |
| Prio. 1 | | | |
| FA1 | Überbrücken der Zelle | F1 | Schaltfunktion |
| FA1.1 | Überbrücken der Zelle bei unterschreiten der Spannungsgrenze $U=1.6V$ (default) ODER Schalter $S1=0$ | F1.1 | Messung der Zellspannung |
| FA2 | Wiederzuschalten wenn Ladestrom fließt | F1 | Schaltfunktion |
| FA2.1 | Zuschalten der Zelle bei Detektion eines Ladestromes ODER Schalter $S1=1$ | F2 | Detektion der Stromrichtung |
| FA2.2 | Wiederzuschalten per Prüfgerät | F2.2 | Gerät schaltet bei Anlegen eines 3,3V TTL Pegel zu |
| FA2.3 | Erkennung wenn alle Module in Brücke sind | F2.3 | wenn Modul in Brücke, wird 3,3V TTL Pegel ausgegeben |
| FA3 | Automatikbetrieb | F3 | Automatik - Manuell Umschaltfunktion |
| FA3.1 | durch Tastendruck ein- und ausschaltbar | | |
| FA4 | Manueller Betrieb | F4 | Brücke - IN Schaltfunktion Manuell |
| FA4.1 | mit Schalter rein- oder rausschalten der Zelle wählbar | | |
| FA5 | Anzeige des Schaltzustandes der Halbleiterschalter | F5 | Anzeigefunktion |
| FA6 | Gehäuse direkt auf Zelle befestigt | | |
| FA6.1 | Keine Verkabelung zwischen den Modulen | F6 | Spannungsversorgung aus der Zelle. |
| | | | |
| Prio. 2 | | | |
| FA7 | Messung der Bezugsspannung der Referenzelektrode | F7 | Cadmiumstab senken, heben |
| | | F7.1 | Spannungsmessung zur Referenzelektrode |
| | | F7.2 | Bereitstellung der Potentialdifferenz |
| FA7.3 | Information an Schreiber wenn Cadmiumstab gesenkt ist | F7.3 | TTL 3,3 high Ausgang wenn Stab gesenkt ist |
| FA7.4 | Cadmiumstab senken per Prüfgerät | F7.4 | wenn TTL 3,3 high am Eingang angelegt werden, wird Stab abgesenkt |
| FAb | | | Spannungsversorgung der Mechanik |
| | | | |
| Prio. 3 | | | |
| FA8 | Messwert Erfassung mit dem Modul | | |
| FA8.1 | Spannung | F8.1 | Spannungsmessung zwischen Referenz und Batteriepol |
| FA8.2 | Temperatur | F8.2 | Temperaturmessung der Säure |
| FA9 | Messwert Bereitstellung, Hyperterminal am PC | F9 | Datenverbindung unter den Modulen, Empfänger am PC |

Tabelle 1: Anforderungsanalyse, Funktionsanforderungen

Zusätzlich zu den Funktionsanforderungen sind qualitative Anforderungen (QA) zu erfüllen. Diese sind in Tabelle 2 zu sehen. Die Nummerierung bezieht sich auf die Strukturierung in Tabelle 1.

| qualitative Anforderungen | |
|---------------------------|--|
| QA1 | Eigensicherer Brückenschalter; ein Kurzschluss der Zelle muss vermieden werden |
| QA1.1 | Default-Zustand nach Montage: IN |
| QA1.2 | Leckströme sollen bekannt sein |
| QA1.3 | Maximal Betriebsstrom beträgt +/- 200 A |
| QA1.4 | Schaltsschwellen in der Firmware einfach änderbar |
| QA1.5 | Toleranz +/- 50 mV |
| QA2 | Stromrichtungsdetektion ab Betrag 5 A |
| QA3.1 | Anzeige: Automatik, Manuell |
| QA5 | Anzeige: Zelle Bridge, In |
| QA6 | Anschlussmaße der Zelle siehe Zeichnung, max. Gehäusehöhe ab Oberkante Pol: 90 mm, IP65, säureresistent, hauptsächlich Schwefelsäure |
| QA6.1 | Funktionsfähig ab 1,5 V |
| QA7 | Wechsel des Cadmiumstabs muss möglich sein, Chemikalienbeständige Mechanik, keine Funken, Abdeckung für Stopfen günstig |
| QA7.1 | Eintauchtiefe einstellbar, für 3 verschiedene Stopfenlängen |
| QA7.2 | Messung ca. 3 min |
| QA8 | 5mV Messgenauigkeit |
| QA8.1 | 1°C Temperaturgenauigkeit |
| QA8.2 | Kontakt für Anschluss des Schreibers an PT100 |
| QA9 | Plug and Play unter den Modulen, max. 33 Module |
| QAa,b | Stromverbrauch des Moduls max. 20mA |

Tabelle 2: Anforderungsanalyse, qualitative Anforderungen

3.2 Schaltprinzip

Aus der Anforderungsanalyse wird ersichtlich, dass die Schaltfunktion (F1) umgesetzt werden muss. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Anordnung der Schaltelemente.

Die Abbildung 4 zeigt die Schaltfunktion, um die Zelle wahlweise zum Verbund zu- oder abzuschalten. Zur Erklärung der Schaltvorgänge wird folgende Ausgangssituation angenommen: Der IN⁴-Schalter ist geschlossen, BR⁵ ist offen, die Zelle ist in den Verbund geschaltet und kann vom Prüfstand geladen und entladen werden. Wird der BR-Schalter geschlossen, öffnet sich gleichzeitig der IN-Schalter und die Zelle wird vom Prüfstand nicht mit geladen oder entladen.

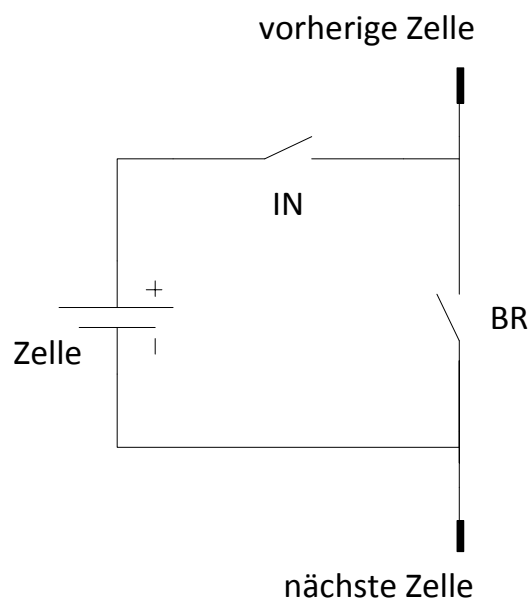


Abbildung 4: Schaltprinzip

Dieses Prinzip wird bei der Firma Hoppecke im Projekt „elektrisch Fliegen“ bereits erfolgreich angewendet und in dieser Arbeit wieder aufgegriffen.

⁴ Die Zelle ist im Verbund, in Reihenschaltung mit den anderen Zellen und dem Prüfstand verbunden

⁵ Brücke, die Zelle ist überbrückt, aus dem Verbund Herausgeschaltet, auch Bridge genannt

4 Umsetzung des Prüfsystems

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Punkte bei der Realisierung der Funktionen beschrieben. Es werden Lösungsansätze für vorhandene Problemstellungen aufgezeigt.

4.1 Spannungsversorgung

4.1.1 Anforderungen

Die Spannungsversorgung nutzt die Energie aus der Bleizelle, um die Schaltung mit Strom zu versorgen. Das hat den Vorteil, dass eine Verkabelung untereinander entfällt und auch eine Potentialtrennung zwischen den Modulen vorhanden ist.

4.1.2 Elektronik

Aufgrund der niedrigen Entladeschlussspannung einer Bleizelle von 1,6 V, wird diese mit einem Step-Up Wandler auf 5 V hochgesetzt. Damit wird der MOSFET Treiber versorgt. Ein Linearregler, der die Spannung auf 3,3 V bringt dient zur Versorgung des Mikrocontrollers und der Anzeige-LEDs⁶.

Als Antrieb für die Mechanik des Cadmiumstabs wurde ein Modellbauservo ausgewählt, diese arbeiten typischerweise mit 4,5 – 5,5 V. Bei Messungen zum Stromverbrauch des Servos wurde eine hohe Impulsbelastung von 1 A gemessen. Die Motoren im Servo werden mit PWM⁷ angesteuert. Um die Betriebssicherheit des Moduls auch bei zusammenbrechen der Servoversorgungsspannung zu gewährleisten, ist ein 2. Netzteil auf der Platine integriert. Der prinzipielle Aufbau der kompletten Spannungsversorgung ist in der nachfolgenden Abbildung 5 ersichtlich.

⁶ Leuchtdiode

⁷ Pulsweitenmodulation

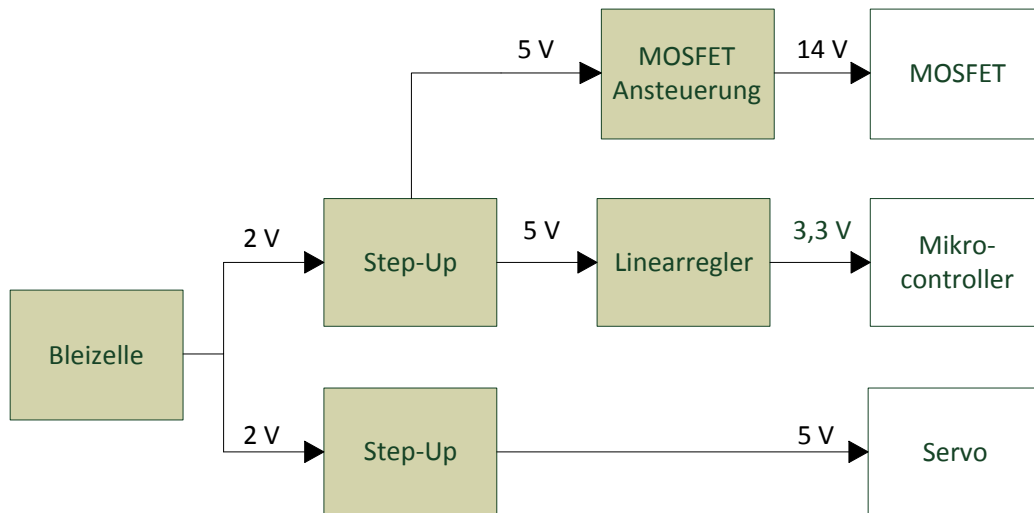


Abbildung 5: Aufbau der Spannungsversorgung

4.2 Heben und Senken des Cadmiumstabs

4.2.1 Anforderung

Es ist notwendig, dass der Cadmiumstab in die Säure eintaucht, um ein Potential zwischen Säure und Pol messen zu können. Der Säurestand kann, wie in Abbildung 6 ersichtlich, zwischen minimal und maximal variieren. Weiterhin werden bei der Firma Hoppecke drei unterschiedlich lange Stopfen für verschiedene Batterietypen verbaut. Zur möglichst einfachen Montage von LESY sollte das Öffnen des Deckels des Nachfüllstutzens genügen. Damit wird bei der Montage von LESY das Entfernen des Stopfens umgangen. Mit einer flexiblen Hubmechanik wird es möglich, verschiedene Stopfen und Füllstände abzudecken. Daher wurde eine Hubhöhe des Cadmiumstabes von mindestens 60 mm festgesetzt. Der Antrieb muss außerdem vor den schädlichen Säuredämpfen geschützt werden. Da die Energie zum Heben des Cadmiumstabes aus der Bleizelle selbst stammt sollte der Energieverbrauch möglichst gering sein.

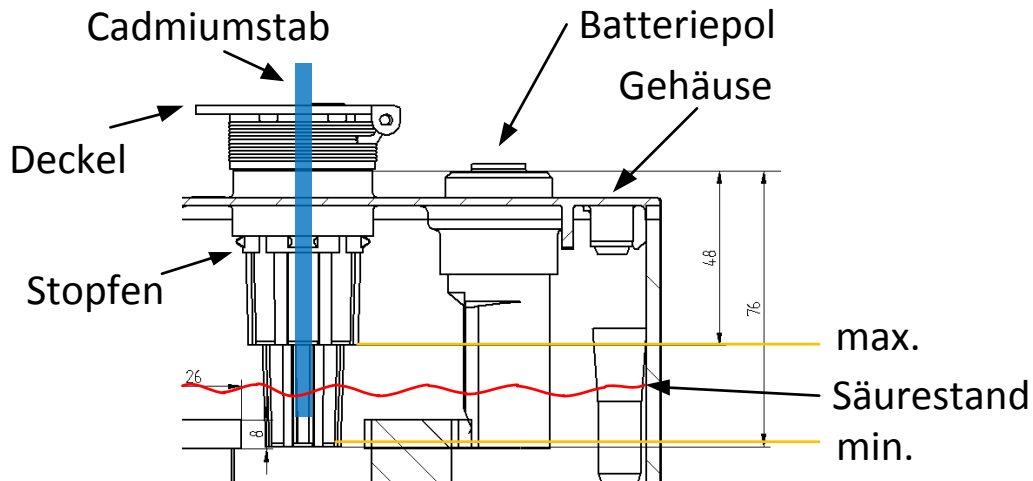


Abbildung 6: Detaildarstellung der Bleizelle mit eingeführtem Cadmiumstab [5]

4.2.2 Ansteuerung und Versorgung

Die hohe Dynamik eines Linearaktors wird bei dem Bewegen des Cadmiumstabs nicht benötigt. Weiterhin benötigt dieser dauerhaft Energie um die Endpositionen halten zu können. Bei einem elektromagnetischen Aktor kann eine komplett gekapselte Antriebseinheit umgesetzt werden. Ein Spindeltrieb benötigt eine zusätzliche Führung und Schalter für die Endlagenbestimmung. Deshalb wird ein kleiner und kostengünstiger Antrieb wird mit einem Modellbauservo realisiert. Der Vorteil eines Servo besteht in der Ansteuerung mit einem PWM Signal, welches mit geringem Aufwand durch einen Mikrocontroller erzeugt werden kann. Die integrierte Elektronik regelt nach der Impulsdauer des PWM Signals den Drehwinkel des Servo. Dadurch kann auf eine Zustandsabfrage mittels Endschalter verzichtet werden. Das Getriebe ist aufgrund der hohen Untersetzung selbsthemmend. Beim Zuschalten fährt das Servo in die Stellung, die der Pulsweite des PWM Signales entspricht. Im ungünstigsten Fall dreht sich das Servo von einer in die andere Endlage. Diesen hohen Strombedarf muss die Spannungsversorgung liefern können.

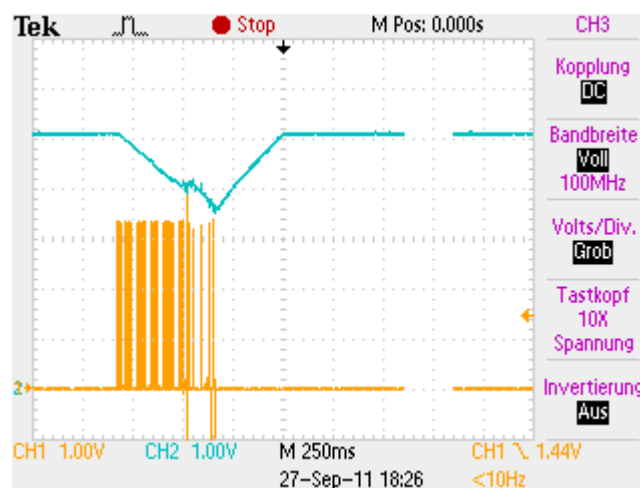


Abbildung 7: Versorgungsspannung bei Servodrehung

Das Servo hat, wie im Kapitel Spannungsversorgung bereits beschrieben, eine eigene 5 V Versorgung. In Abbildung 7 ist der Spannungseinbruch bei einer kompletten Bewegung des Servos dargestellt (Messkanal 2, türkis). Weiterhin ist der Verlauf des Motorstroms erkennbar (Kanal 1 orange). Die Spitzenwerte entsprechen dabei 1 A, ohne Belastung des Servos. Gegen das Einbrechen der Versorgung wurden folgende Maßnahmen ergriffen: Zwei Kondensatoren⁸ puffern die Versorgungsspannung und der Controller verändert die Ansteuerimpulse in Schritten mit je 0,1 s Pause, somit bewegt sich der Stab langsam auf und ab.

⁸ Je 22 mF

4.2.4 Software

Zur Ansteuerung des Servo erzeugt der Controller mit Hilfe eines Timers das PWM-Signal. Nach dessen Initialisieren entspricht das Signal dem Verlauf, wie in Abbildung 9 zu sehen. Das Servo fährt in die obere Endposition. Soll der Cadmiumstab abgesenkt werden, wird die Impulsdauer verändert. Das Signal für die untere Endlage ist in Abbildung 10 dargestellt.

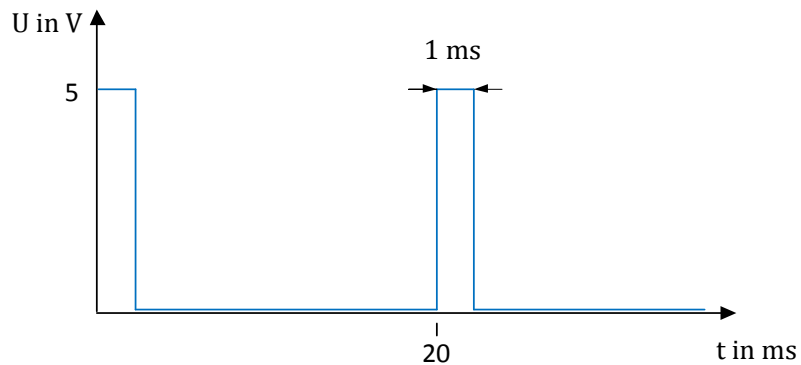


Abbildung 9: PWM-Signal für Servo Rechtsanschlag

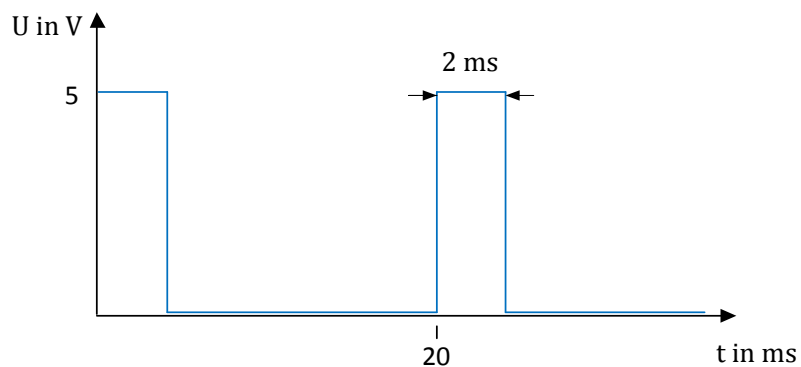


Abbildung 10: PWM-Signal für Servo Linksanschlag

4.3 Leistungsschalter

4.3.1 Anforderungen

Der zu schaltende Strom und die Spannung müssen bei der Auswahl der Schaltelemente berücksichtigt werden, im diesem Fall maximal 200 A, und die Summe der Spannung der angeschlossenen Zellen. Die Schalthäufigkeit liegt im Minutenbereich und kann vernachlässigt werden. Eine geeignete Schutzschaltung muss vorgesehen werden, damit kein Kurzschluss durch gleichzeitiges Schließen beider Schalter entstehen kann. Die Verlustleistung beim Schalten muss vom Leistungshalbleiter thermisch aufgenommen werden, da die Wärmeleitung zum Gehäuse einen zu großen thermischen Übergangswiderstand besitzt. Aus diesem Grund ist es günstig wenn der FET möglichst schnell durchgeschaltet wird.

4.3.2 Auswahl von Schalteryarianten

Zur Auswahl stehen Relais, MOSFET¹⁰ und IGBT¹¹. Relais haben den Vorteil, dass Verlustleistung nur am Übergangswiderstand der Kontaktstelle abfällt. Mit Wechselkontakten ist eine Schaltung realisierbar, bei der nie beide Kontakte gleichzeitig geschlossen sind. Nachteilig ist, dass bei hohen Schaltströmen eine hohe Ansteuerleistung benötigt wird und kleine Bauformen schwer zu finden sind. Weiterhin arbeiten Relais nicht verschleißfrei. Aus diesen Gründen wird kein Relais verwendet.

¹⁰ Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor, Halbleiterbauelement welches Verwendung in der Leistungselektronik findet

¹¹ Insulated-Gate Bipolar Transistor, Halbleiterbauelement das in der Leistungselektronik eingesetzt wird, Vereint gutes Durchlassverhalten, hohe Sperrspannung und die Robustheit eines Bipolartransistors, mit der nahezu leistungslosen Ansteuerung eines Feldeffekttransistors.[6]

4.3.2.1 Vergleich der Halbleiterschalter

MOSFET

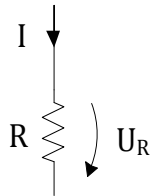


Abbildung 11: Verlustleistung MOSFET

$$P_V = I^2 \times R \quad (1)$$

IGBT

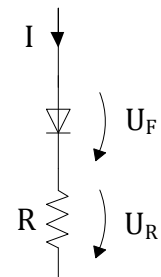


Abbildung 12: Verlustleistung IGBT

$$P_V = U_F \times I + I^2 \times R \quad (2)$$

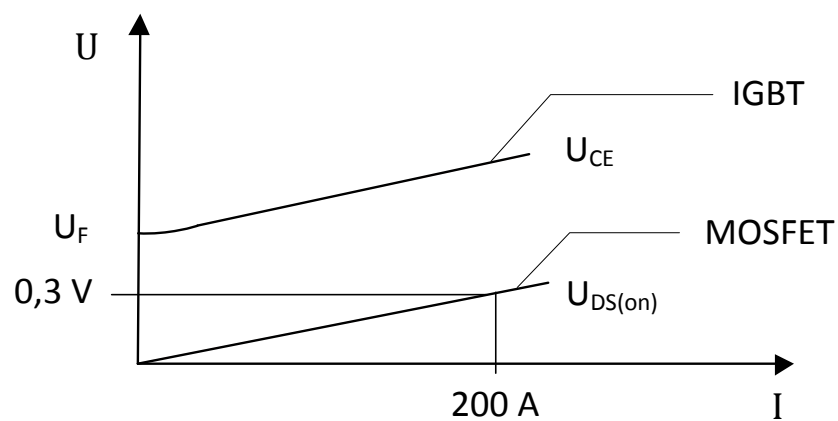


Abb #: 1

Abbildung 13: Vergleich von MOSFET und IGBT

Ein IGBT ist geeignet zum Schalten von hohen Spannungen, besonders bei niedrigen Schaltfrequenzen. Da jedoch immer zusätzlich Verlustleistung über der Flussspannung abfällt (siehe Abbildung 13), wurde der MOSFET eingesetzt.

Ein wichtiges Auswahlkriterium ist ein möglichst niedriger Einschaltwiderstand $R_{DS(on)}$ ¹² und eine gute Wärmeabfuhr an das Gehäuse. Um den Durchgangswiderstand weiter zu verringern, werden mehrere MOSFETs parallel geschaltet. Laut Datenblatt kann ein MOSFET bei 70 °C einen Strom von maximal 29 A tragen[7]. Der Maximalstrom durch das Modul von 200 A teilt sich auf 8 Halbleiter auf. Jeder FET muss 25 A schalten.

Folgender Typ kommt aktuell zum Einsatz:

IRF6797MTRPbF von International Rectifier im MX Gehäuse

Technische Daten: [7]

| | |
|--------------|---|
| V_{DSS} | = 25 V maximal |
| $R_{DS(on)}$ | = 1.5 m Ω bei V_{GS} = 10V und 70 °C |
| I_D | = 29 A maximal bei 70 °C |

¹² Bezeichnet den minimalen Durchgangswiderstand eines Feldeffekttransistors.

4.3.2.2 Berechnung der Verlustleistung an allen MOSFETs

Laut Datenblatt wird ein $R_{DS(on)} = 1.5 \text{ m}\Omega$ bei 70°C Gehäusetemperatur angenommen. 8 FET werden je Seite parallel geschaltet.

$$P_V = R_{DS(on)} * I^2 \quad (3)$$

$$P_V = 1.5 \text{ m}\Omega \div 8 * (200 \text{ A})^2$$

$$P_V = 7,5 \text{ W}$$

Ansteuerung der MOSFETs:

Um einen möglichst geringen $R_{DS(on)}$ im leitenden Zustand zu erreichen, müssen die MOSFETs mit einer Spannung von mind. 10 V am Gate¹³ angesteuert werden. Die Ausgangsspannung des Controllers von $3,3 \text{ V}$ steuert einen MOSFET-Treiber¹⁴ an. Dieser arbeitet intern mit einer Betriebsspannung von 14V und steuert damit die FETs an. Eine Inverter-Schaltung (siehe Abbildung 14) am Controller-Ausgang sorgt dafür, dass jeweils nur eine MOSFET-Bank angesteuert und somit ein Kurzschluss verhindert wird.

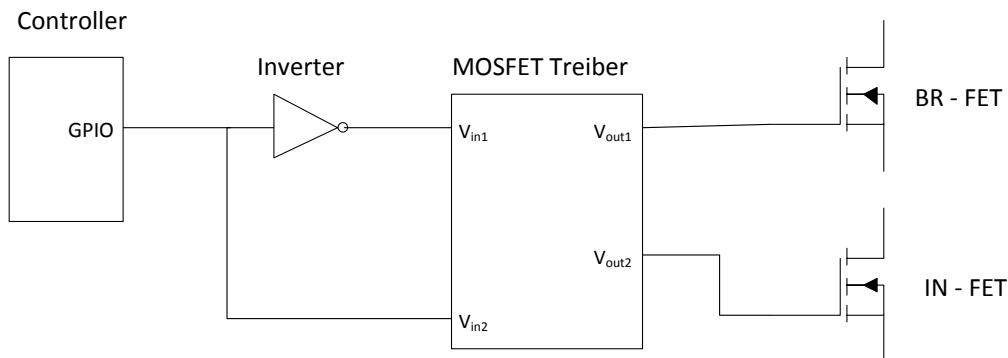


Abbildung 14: Schaltung zur Ansteuerung der FETs

¹³ Steueranschluss für den Halbleiter

¹⁴ (IC4) LTC1163 von Linear Technology

4.3.3 Auslegung der Kühlung

Alle FETs werden als SMD¹⁵ auf die Platine gelötet. Über das Metallgehäuse erfolgt die Wärmeabfuhr hauptsächlich von der Platinenseite weg, wie in Abbildung 15 zu sehen ist.

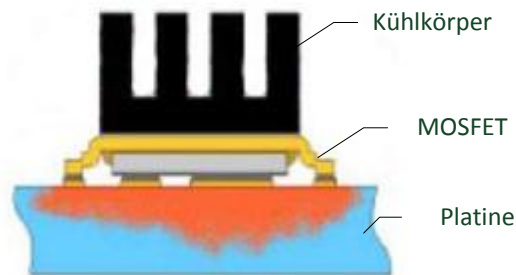


Abbildung 15: Konzept zur Kühlung laut Datenblatt [7]

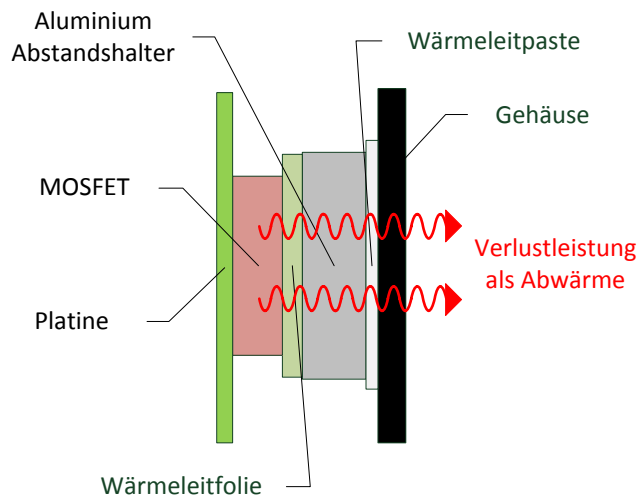
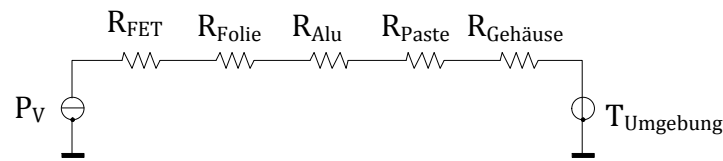


Abbildung 16: Wärmeleitung innerhalb des Moduls

Die FETs für die BR- und für die IN-Seite werden zur Kühlung thermisch an das Gehäuse von LESY kontaktiert. Das Gehäuse der FETs ist gleichzeitig der Drain-Anschluss. Um einen Kurzschluss über das Gehäuse zu vermeiden, müssen die MOSFET-Bänke gegenüber dem Aluminiumgehäuse von LESY elektrisch isoliert werden. Aus der Abbildung 16 ist ersichtlich, dass dies über eine isolierende Wärmeleitfolie realisiert wird.

¹⁵ surface-mounted device (zu Deutsch: oberflächenmontiertes Bauelement)

Thermisches Ersatzschaltbild:



$$R_{Ges} = R_{FET} + R_{Folie} + R_{Alu} + R_{Paste} + R_{Gehäuse} \quad (4)$$

$$R_{Ges} = 1,4 \frac{K}{W} + 0,4 \frac{K}{W} + 0,1 \frac{K}{W} + 0,1 \frac{K}{W} + 5 \frac{K}{W} = 7 \frac{K}{W}$$

Berechnung des Temperaturanstieges bei maximalem Strom:

$$T = P_V \times R_{Ges} \quad (5)$$

$$T = 7,5 W \times 7 \frac{K}{W}$$

$$T = 52,5 K$$

4.4 Stromschienen

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der elektrischen Anbindung von den MOSFETs zur Stromschiene und der Kontaktierung zur Bleibatterie.

4.4.1 Anforderungen

Ziel ist es, eine preisgünstige Lösung für die Verbindung der Leistungshalbleiter zu den Batteriepolen zu finden. Sie muss säurefest und stabil genug sein, um als Befestigungsmöglichkeit von LESY auf der Batterie zu dienen.

4.4.2 Mechanik

Zur Verbindung der Zellen untereinander werden bei der Firma Hoppecke derzeit verschiedene Verbinder der Firma Frötek eingesetzt. Unter anderem starre Kupferverbinder mit einem Querschnitt von 70 mm^{16} . Diese sind mit Kunststoff ummantelt und schließen zusammen mit der passenden Frötek Schraube gasdicht auf dem Batteriepol ab. Um LESY stehend auf der Zelle montieren zu können, werden die Verbinder um 90° gebogen.

¹⁶ FRÖTEK 714 140 4176

4.4.3 Elektronik

Die elektrische Verbindung der Frötek-Zellverbinder mit der Platine wird über Kupferflächen auf der Leiterplatte sichergestellt. Mechanisch wird der Kontakt über eine Schraubverbindung mit Einpressgewindebolzen¹⁷ in der Kupferschiene und Löchern in der Leiterplatte hergestellt.

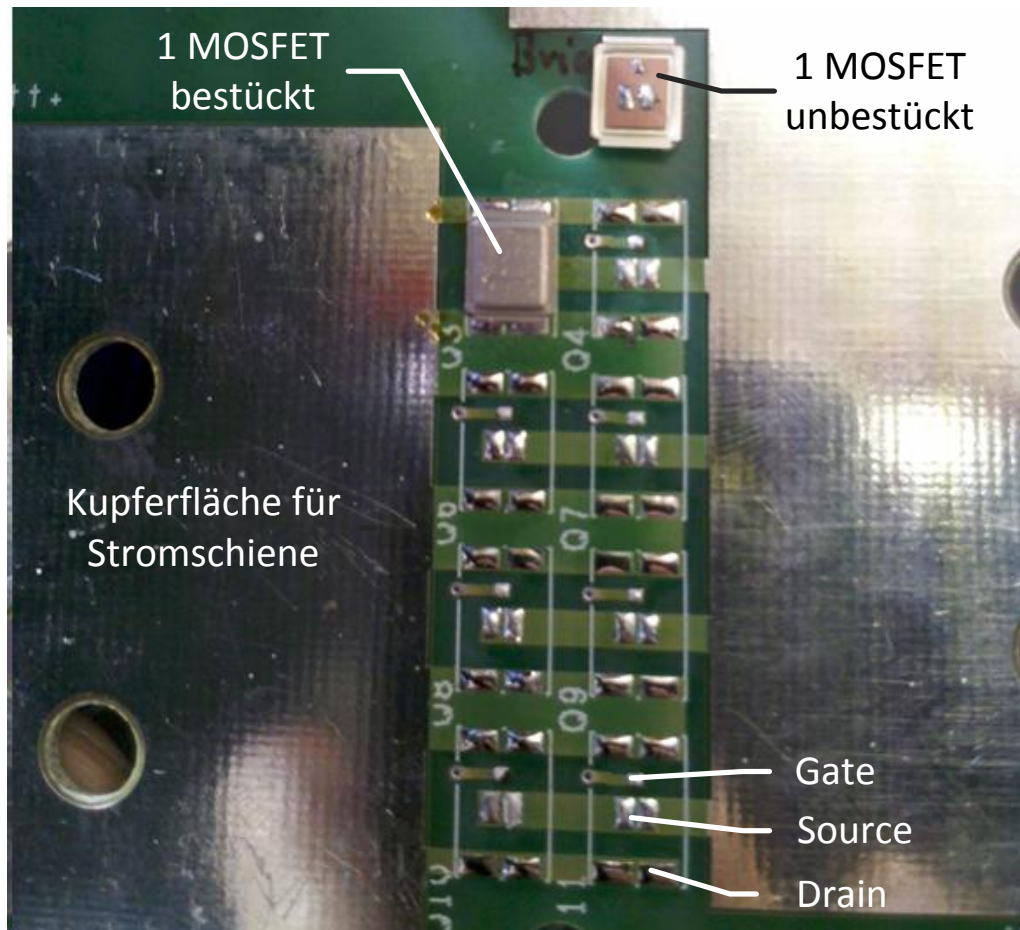


Abbildung 17: Lötverbindung der FETs auf der Powerplatine

4.4.4 Aufteilung der Platinen

Die gesamte Elektronik ist auf 2 Leiterplatten aufgeteilt, die Power- und die Controllerplatine. Zum einen wird damit dem beschränkten Platzangebot Rechnung getragen, andererseits ist die Controllerplatine mit einer 35 μm Kupferauflage ausgestattet, die feine Ätzstrukturen z.B. für den Controller ermöglicht. Die Powerplatine ist jedoch mit einer 70 μm Kupferauflage versehen, um die Stromtragfähigkeit der Leiterbahnen zu erhöhen. Abbildung 17 zeigt die Anordnung der MOSFETs auf der Platine.

¹⁷ FHS-M5-L 15 von KVT

5 Bewertung der Ergebnisse

Um die Funktionen zu überprüfen und die Funktionsweise im Praxiseinsatz vorzustellen, wurden Tests an einer Bleibatterie durchgeführt. Mit einem Prüfstand wurde ein kompletter Messzyklus durchlaufen und wichtige Werte aufgezeichnet. Alle realisierten Funktionen wurden einzeln getestet und bewertet.

5.1 Verlauf der Endabnahme

Ein Batterietrog mit Bleizellen, der bei der Fa. Hoppecke zu Testzwecken zur Verfügung steht, wird für die Endabnahme genutzt, wie in Abbildung 19 zu sehen ist. Davon werden sechs Zellen in Reihe mit einem Prüfstand der Firma FuelCon¹⁸ verbunden. Jede Zelle hat eine Kapazität von 420 Ah bei einer Nennspannung von 2 V. Da die Stopfen der verwendeten Bleizellen keinen Deckel zum Aufklappen besitzen, wird der gesamte Stopfen entfernt, und LESY aufgeschraubt.



Abbildung 18: Funktionsmuster

¹⁸ Modell Nummer: 420096700

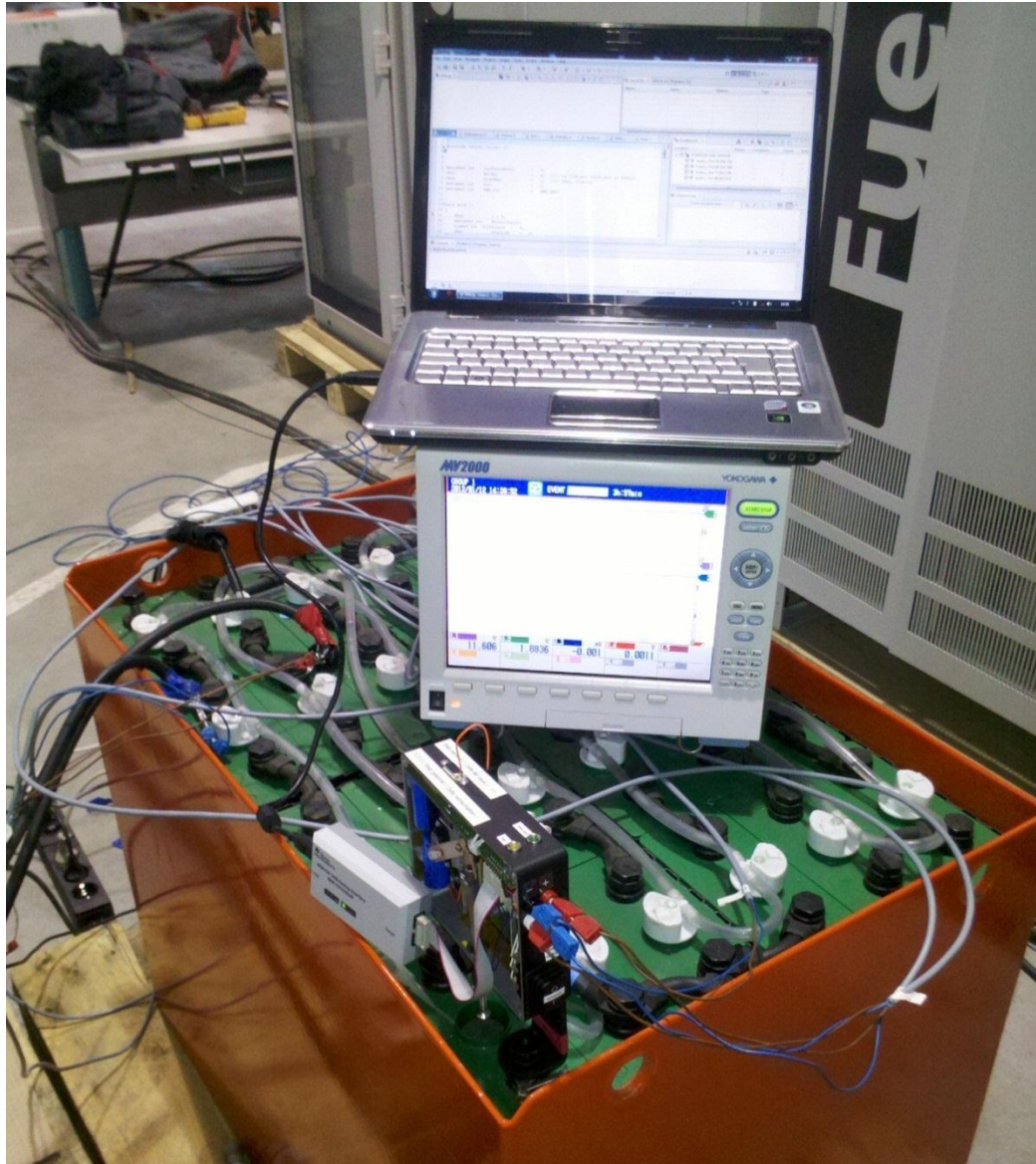


Abbildung 19: Messaufbau zur Endabnahme

Zum Protokollieren der Ströme und Spannungen sind verschiedenen Messpunkte mit einem Datenschreiber¹⁹ verbunden. Zum Laden bzw. Entladen mit Konstantstrom können am Prüfstand verschiedene Werte eingegeben werden.

Nach vollständigem Aufbau wird als erstes ein Test aller Funktionen unter Last durchgeführt, das Ergebnis ist in Tabelle 3 des Kapitels 5.2 dargestellt. Anschließend wurde ein kompletter Zyklus gestartet und mit dem Datenschreiber aufgezeichnet. Der Verlauf ist im Abschnitt 5.3 zu sehen.

¹⁹ YOKOGAWA MV2000

5.2 Test der realisierten Funktionen

Nach dem Schema der Anforderungsanalyse wurden die einzelnen Funktionen getestet und beurteilt.

| Prio. I | | Funktion | Bemerkungen |
|-----------|---|----------|--------------------|
| F1 | Schaltfunktion | i.O. | bis 200 A getestet |
| F1.1 | Messung der Zellspannung | i.O. | |
| F2 | Detektion der Stromrichtung | i.O. | ab 10 A |
| F2.2 | Gerät schaltet bei Anlegen eines 3,3V TTL Pegel zu | i.O. | |
| F2.3 | wenn Modul im Bridge, wird 3,3V TTL Pegel ausgegeben | i.O. | |
| F3 | Automatik - Manuell Umschaltfunktion | i.O. | |
| F4 | Brücke - IN Schaltfunktion manuell | i.O. | |
| F5 | Anzeigefunktion | i.O. | über LED |
| F6 | Spannungsversorgung aus der Zelle. | i.O. | |
| Prio. II | | | |
| F7 | Cadmiumstab senken, heben | i.O. | |
| F7.1 | Spannungsmessung zur Referenzelektrode | | nicht realisiert |
| F7.2 | Bereitstellung der Potentialdifferenz | i.O. | |
| F7.3 | TTL 3,3 high Ausgang wenn Stab gesenkt ist | i.O. | |
| F7.4 | wenn TTL 3,3 high am Eingang angelegt werden, wird Stab abgesenkt | i.O. | |
| Prio. III | | | |
| F8.1 | Spannungsmessung zwischen Referenz und -Pol | | nicht realisiert |
| F8.2 | Temperaturmessung der Säure | | nicht realisiert |
| F9 | Datenverbindung unter den Modulen, Empfänger am PC | | nicht realisiert |

Tabelle 2: Test der Funktionen

Aus der Tabelle ist abzulesen, dass alle realisierten Funktionen wie vorgesehen wirken.

Um die Dichtheit des Gehäuses zu gewährleisten muss das Modul vergossen werden. Darauf wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da es sich um ein Funktionsmuster handelt und eine Demontage gewährleistet werden soll.

5.3 Test eines kompletten Zyklus

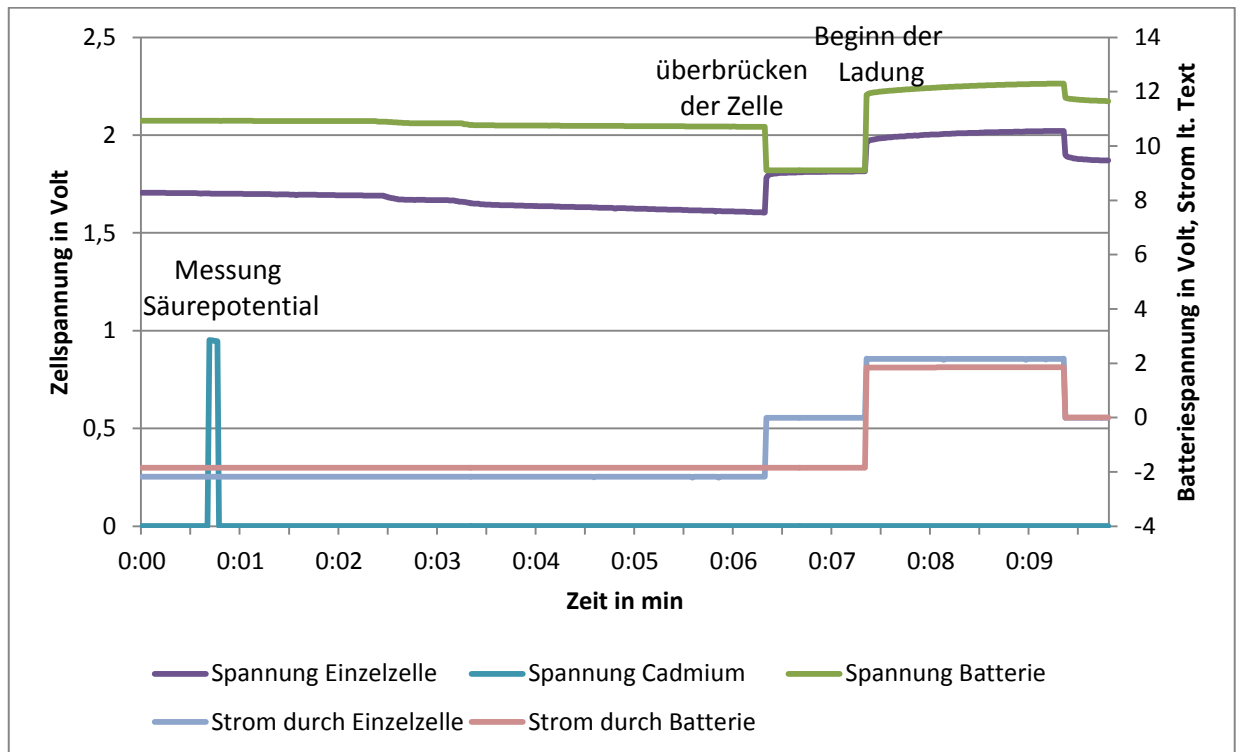


Abbildung 20: Spannungs-, Stromverläufe des Messzyklus

In Abbildung 20 ist ein Ausschnitt aus der Aufzeichnung eines kompletten Messzyklus zu sehen. Der Entladestrom ist nur qualitativ abgebildet und entspricht -70 A. Als erstes ist erkennbar das bei 1,7 V der Einzelzelle der Cadmiumstab in die Säure getaucht und das Potential von 0,95 V gemessen wird. Nach der Wartezeit von 5 s wird der Stab wieder herausgezogen.

Bei Erreichen von 1,6 V Zellspannung wird die Zelle überbrückt: Es fließt kein Strom mehr durch die Einzelzelle, die anderen werden weiter entladen. Von da an ist der Einbruch der Gesamtspannung, durch das Fehlen einer Zelle zu beobachten. Die Spannung an der unbelasteten Zelle springt nach oben und nähert sich der Ruhespannung an.

Nach ca. zwei Minuten wurde am Prüfstand auf Laden mit 70 A umgeschaltet. Die Zelle wird vom Ladestrom durchflossen weil LESY diese wieder mit der Reihenschaltung verbunden hat. Die Gesamt- und Einzelspannungen steigen in Folge der Ladung an.

5.4 Test mit Maximalstrom

Der Versuchsaufbau entspricht dem der Endabnahme. Die Bleibatterie wurde mit 200 A nacheinander geladen und entladen, dabei wurde die Bleizelle im Handbetrieb dem Verbund zu- oder abgeschaltet. Dieser Schalttest bei Maximalstrom verlief wie vorgesehen.

Um die thermischen Verhältnisse zu überprüfen, wurde bei einem Ladestrom von 200 A die Wärmeverteilung und Maximaltemperatur mit einer Wärmebildkamera überwacht.

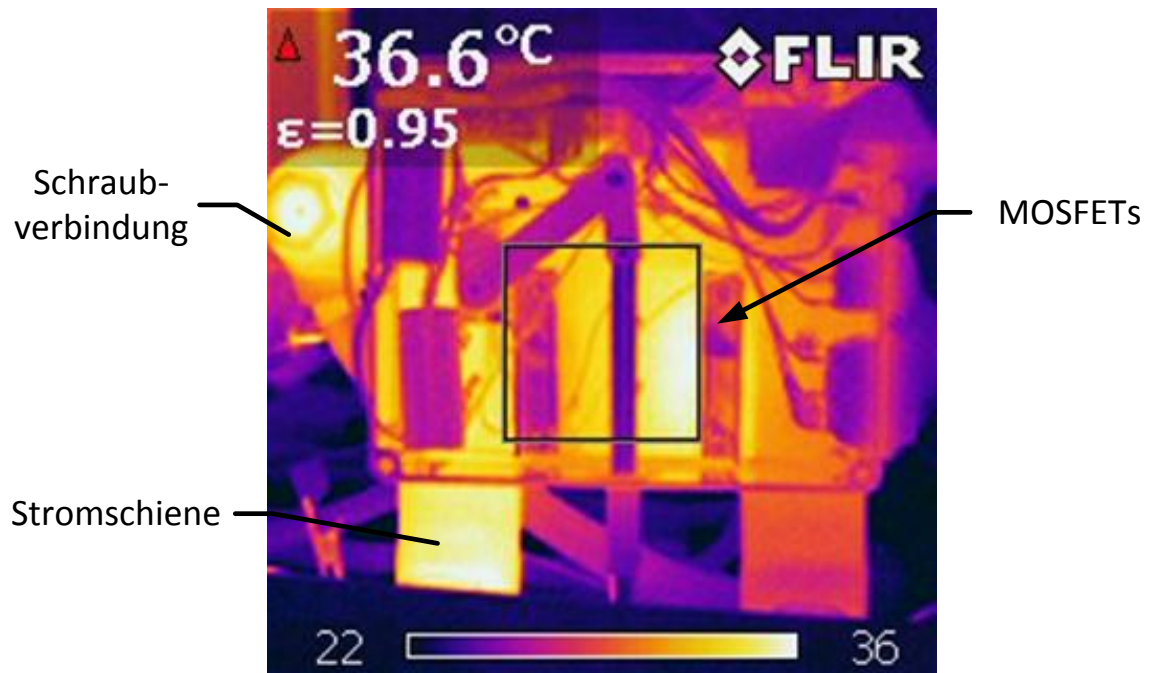


Abbildung 21: Wärmeverteilung bei Maximalstrom

Abbildung 21 zeigt die Verteilung der Temperaturen nach 45 min Ladezeit. Die Stromschienen haben eine unkritische Temperatur von 50 °C. Der Temperaturanstieg an der Schraubenverbindung ist auf einen hohen Übergangswiderstand, aufgrund eines zu geringen Anzugsmomentes der Schraube zurückzuführen. Der Test wurde nach circa 50 min abgebrochen, nachdem der Bereich der Platine, an dem die FETs aufgelötet sind, eine Temperatur von 90 °C erreicht hatte.

Um Bleibatterien mit dem vorgegebenen Maximalstrom testen zu können muss die Kühlung der Halbleiter verbessert werden. Bei einem Test mit 150 A Ladestrom über einen Zeitraum von 120 min blieb die höchste gemessene Temperatur unter einem Wert von 70 °C.

6 Zusammenfassung

Das Thema der Bachelorarbeit ergibt sich aus den aufwendigen Tests, die bei der Lebensdauerprüfung von Blei-Säure-Batterien notwendig sind. Aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit von Messkanälen und Prüfständen im physikalischen Labor der Firma Hoppecke, werden mehrere Bleizellen in Reihe geschaltet und gemeinsam an einem Messkanal getestet.

Beim Kapazitätstest ist die enthaltene Ladungsmenge jeder Zelle von Interesse. Die gesamte Batterie wird soweit entladen, bis die Zelle mit der geringsten Kapazität die Entladeschlussspannung erreicht hat. Sie wird aus der Reihenschaltung entfernt und die übrigen Zellen weiter entladen, bis die nächste Zelle auch überbrückt werden muss. Dieser Vorgang wird derzeit durch die visuelle Erfassung der Spannungen und ein Neukontaktieren der Zellverbinder durchgeführt. Im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit der Messungen, insbesondere gleicher Messzeitpunkte, stellt dies keine hinreichende Lösung dar.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Steuergerät LESY wird zu Beginn des Lebensdauertests auf jede Zelle aufgeschraubt. Nachdem die Zellen untereinander verschalten sind, wird die gesamte Batterie mit dem Prüfstand verbunden und die Messung gestartet. LESY erkennt die Spannungsgrenzen und überbrückt die Batterie selbstständig. Sind alle Zellen getestet, beginnt der Prüfstand mit dem Ladevorgang und alle Zellen werden wieder in den Verbund geschaltet.

Zur Bestimmung des Säurepotentials, wird von dem Modul ein Stab aus Cadmium in die Säure getaucht und anschließend wieder herausgezogen, damit wird verhindert, dass die Zellchemie beeinflusst wird.

Alle Funktionen, die das Schalten und die Messung des Säurepotentials betreffen, konnten umgesetzt werden. Am Ende dieser Arbeit liegt ein Funktionsmuster vor, welches die Endabnahme bestanden hat. In Bezug auf Maximalspannung und –strom darf das Modul jedoch nur eingeschränkt betrieben werden.

Wenn LESY konsequent bei allen Lebensdauerprüfungen im Labor eingesetzt wird, wird die Qualität der Messung erhöht, weil die Spannung ständig kontrolliert wird, das Säurepotential immer bei der gleichen Zellspannung gemessen und die Entladung immer bei Erreichen der Entladeschlussspannung gestoppt wird. Dies ergibt reproduzierbare Messwerte. Durch einen selbstständigen Messablauf, kann die ständige manuelle Überwachung entfallen. Um dies alles zu nutzen, ist eine Weiterentwicklung des Moduls notwendig.

7 Ausblick

7.1 Reihenschaltung der Zellen

Die Anzahl der Zellen, die gemeinsam in einer Reihenschaltung getestet werden können wird durch die Drain Source Spannung der MOSFETs begrenzt. Sollen mehr als 10 Zellen in Reihe getestet werden, müssen MOSFETs mit einer höheren Spannung eingesetzt werden. Dies steht aber im Widerspruch, wenn die FETs für eine hohe Stromtragfähigkeit ausgelegt sind. Somit müssen mehr MOSFETs parallel geschaltet werden was höheren Aufwand verursacht.

7.2 Vorschlag zur Verbesserung der Kühlung

Um bei einem Maximalstrom von 200 A die Verlustleistung der MOSFETs abzuführen ist ein verbessertes Kühlkonzept nötig.

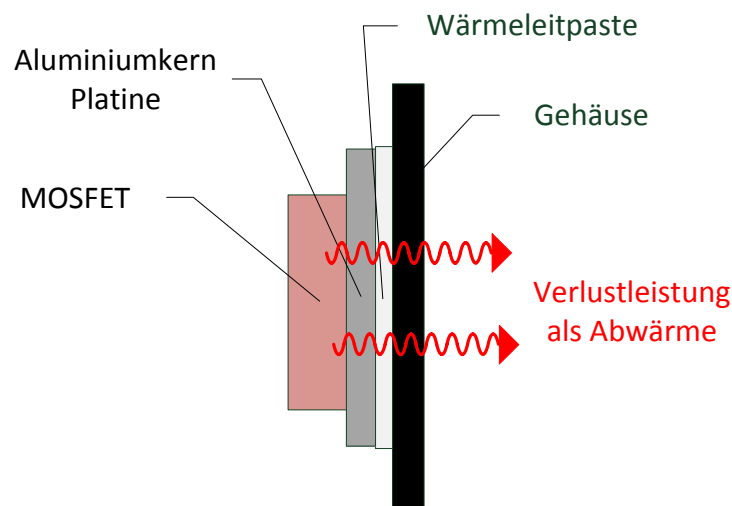


Abbildung 22: Wärmeleitung mit Aluminiumkern-Platine

Eine Platine deren Basismaterial aus Aluminium besteht, auch IMS²⁰ Leiterplatte genannt hat viele Vorteile gegenüber herkömmlichen Platinen. Sie kann mit der unbestückten Seite direkt thermisch mit dem Gehäuse des Moduls verbunden werden, wie in Abbildung 22 dargestellt. Durch die elektrisch isolierende Schicht zwischen den Kupferleiterbahnen und

²⁰ Insulated Metal Substrate. Bei IMS-Leiterplatten wird statt dem üblichen Basismaterial, Aluminium als Träger für das Kupfer verwendet. Aluminiumkern Leiterplatten werden immer dort eingesetzt wo Wärme abgeführt werden muss [8].

dem Aluminium-Basismaterial ist keine zusätzliche Isolierung notwendig. Es muss ein MOSFET mit einem Gehäusotyp gewählt werden, bei dem die Wärmeabfuhr über die Leiterplatte funktioniert. Wenn die Befestigung der Stromschienen durch Gewindebolzen gewählt wird, ist auf eine elektrische Isolierung gegenüber dem Aluminiumkern zu achten. Die meisten IMS Leiterplatten sind nur einlagig ausgeführt. Um das Risiko einer Verzögerung bei der Herstellung und Verarbeitung der Platinen zu verhindern, wurde bei der Konstruktion des Prototypen auf die Verwendung einer IMS Leiterplatte verzichtet und auf einen bewährten Stand mit herkömmlicher Platine gesetzt. Durch die Trennung in Leistungs- und Controllerplatine ist eine Weiterverwendung der Ansteuerung gegeben.

Das Gehäuse gibt durch passive Kühlung die Abwärme an die Umgebungsluft ab. Um das Wärmeabgabevermögen zu erhöhen und die Konvektion zu steigern ist es möglich einen Kühlkörper außen am dem Gehäuse anzubringen.

7.3 Dichtheit des Gehäuses

Um die Elektronik vor den ätzenden Säuredämpfen zu schützen, wurde das Gehäuse mit einem Schutzgrad von IP65 ausgewählt. Auch die Bedienschalter entsprechen dieser Schutzklasse. Alle Durchbrüche des Gehäuses für die Stromschienen, Kontaktbuchsen und Anzeigeelemente müssen vergossen werden. Eine Besonderheit ist die Durchführung für den Cadmiumstab. Für die Verwendung eines Dichtelementes in Form eines Wellendicht- oder Nullringes reicht das Drehmoment des Antriebs nicht aus. Eine Möglichkeit ergibt sich in der Verwendung eines Faltenbalges. Aufgrund der großen Hubhöhe muss dieser jedoch angefertigt werden.

Eine weitere Lösung ist die Verlegung der Hubmechanik nach außen. Eine Gehäusedurchführung der Getriebewelle kann sehr gut durch die Verwendung eines Wellendichttringes umgesetzt werden.

Bei der Verwendung eines anderen Antriebs für die Hubmechanik kann die Abdichtung entfallen oder einfacher umgesetzt werden.

7.4 Antriebsalternative für die Hubmechanik

Eine elektrische Verbindung unter den Modulen ist zu vermeiden. Die damit geringe verfügbare Energie muss zum Antrieb der Mechanik ausreichen. Dies ist mit einem Getriebemotor als Antrieb der Hubmechanik erreichbar.

Die Möglichkeit einer alternativen Energiezuführung von außen bietet die Pneumatik. Ein Kompressor mit Pufferspeicher liefert die Versorgung mit Pressluft. Über dünne Schläuche wird die Luft zu den Modulen geleitet und verteilt. Ein elektrisch angesteuertes Ventil im Modul steuert einen Pneumatikzylinder der den Cadmiumstab bewegt. Es ist keine Potentialtrennung notwendig und wird nur wenig Energie zur Ansteuerung benötigt. Zu-

sätzlich ist ein externes Gerät für die Druckluftzufuhr und die entsprechende Verbindung zu den Modulen nötig.

7.5 Datenverbindung

Um Messdaten wie Spannungs- und Stromwerte von dem Prüfsystem in eine Datenbank zu übertragen, ist eine Datenverbindung notwendig. Dies kann drahtlos, zum Beispiel mit ZigBee²¹, vorzugsweise im 868-MHz-Band, geschehen. Auch IrDA²² kann drahtlos oder über Glasfaserkabel zur Datenübertragung genutzt werden. Zur Kommunikation mit dem Controller sind eine UART²³ und eine SPI²⁴ Schnittstelle vorgesehen

Dies soll nur als Einführung in die Datenübertragung dienen. Dieser Themenbereich wird in der vorliegenden Arbeit nicht behandelt.

7.6 Weiterentwicklung und Abmessungen des Gehäuses

Im Zuge einer Weiterentwicklung des Prüfgerätes sollten die Schalter durch Taster ersetzt werden. Folientaster bieten eine hervorragende Möglichkeit ein abgedichtetes Gehäuse und kleine Bauformen zu verbinden. Auch eine Reduzierung der Hubhöhe des Cadmiumstabes von 60 mm auf circa 35 mm reicht für alle Zelltypen aus, um ein Säurepotential zu messen. Wird die Verwendung des Servo beibehalten, kann nur eine geringe Reduzierung der Baugröße erfolgen. Einen großen Vorteil bei der Fertigung stellt die Nutzung eines einfachen, nicht abgedichteten Gehäuses aus Kunststoff dar. Die Elektronik wird komplett vergossen und mit einem Kühlkörper die Wärmeabfuhr realisiert.

²¹ Funknetz-Standard

²² Forum für die Standardisierung von Infrarottransceivern und Protokollen

²³ Serielle Schnittstelle

²⁴ Programmierschnittstelle

Literaturverzeichnis

- [1] Ausschreibung für die Anfertigung einer Abschlussarbeit bei Hoppecke
(Zugriff am 04.06.2011)

- [2] http://www.acod.de/media/events/kongress2011/referate/riegel_visionen_und_strategien_der_hoppecke_gmbh_für_den_standort_zwickau.pdf
(Zugriff am 25.02.2012)

- [3] http://www.hoppecke.com/products/technologies/blei_saeure
(Zugriff am 25.02.2012)

- [4] <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Nennkapazitaet-rating.html>
(Zugriff am 24.02.2012)

- [5] Zeichnung EL81125, Hoppecke Zelle 2 HPzS 280- 10 HPzS 1400, P555 Europabaureihe

- [6] Josef Lutz: Halbleiter- Leistungsbaulemente. 1. Auflage. Springer Verlag, 2006, ISBN 3-540-34206-0

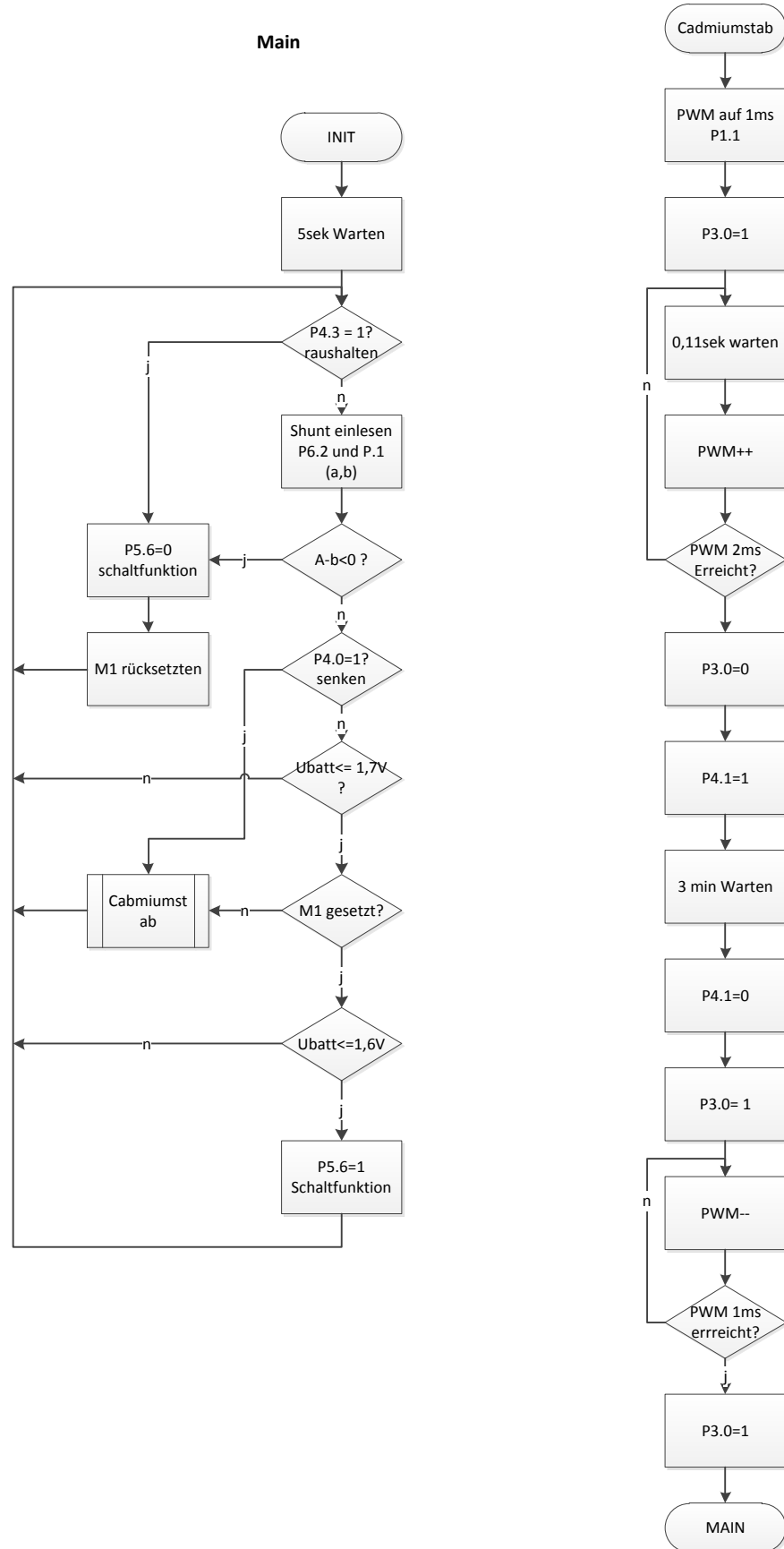
- [7] <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf6797mpbf.pdf>
(Zugriff am 17.05.2011)

- [8] http://www.pcb-pool.com/ppde/info_pcbpool_alupanel.html
(Zugriff am 25.02.2012)

Anlagen

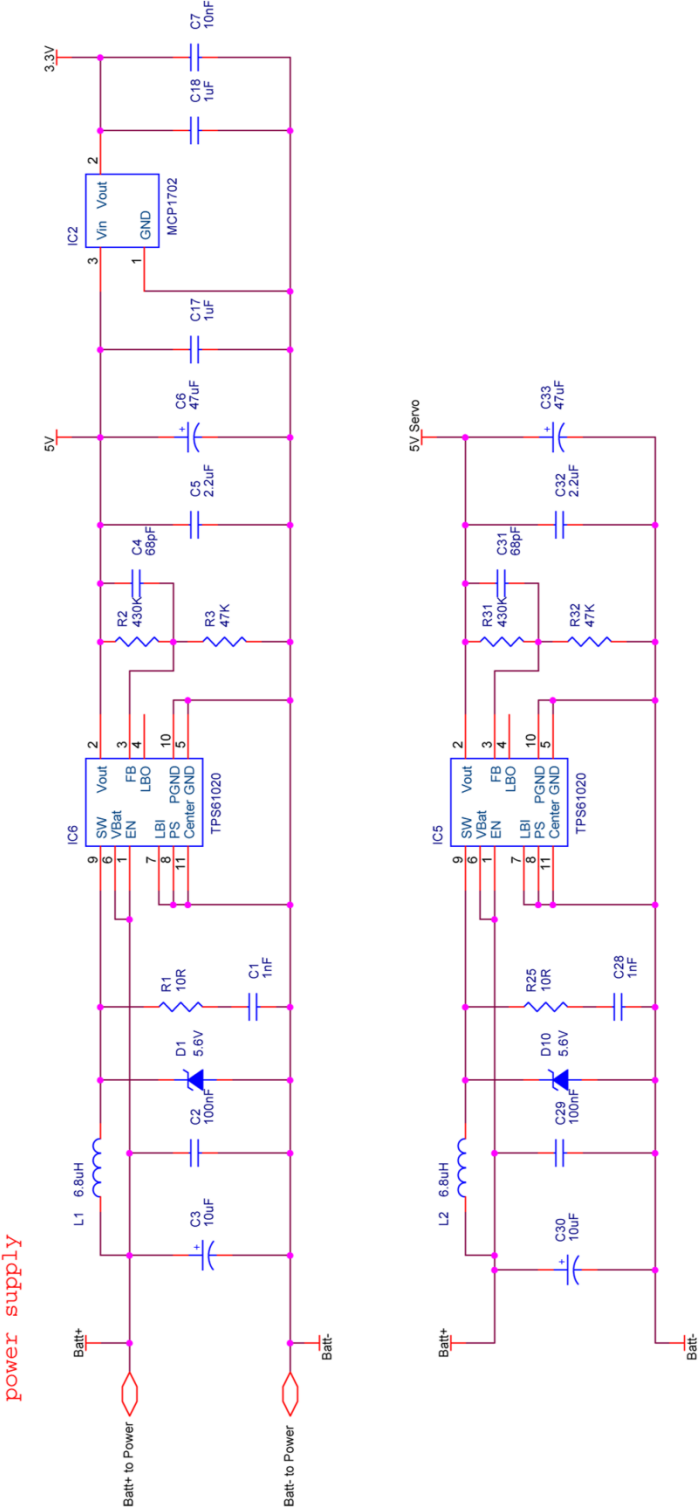
| | | |
|-----------|--|----|
| Anlage 1: | Programmablaufplan | 41 |
| Anlage 2: | Schaltplan Teil Spannungsversorgung | 42 |
| Anlage 3: | Schaltplan Teil Servoansteuerung, UART, LED..... | 43 |
| Anlage 4: | Schaltplan Teil Schnittstellen, Messeingänge | 44 |
| Anlage 5: | Schaltplan Teil Verbindung zu Powerplatine, Messeingänge | 45 |
| Anlage 6: | Schaltplan Teil Strom- und Temperaturmessung | 46 |
| Anlage 7: | Schaltplan Teil MOSFET Treiber | 47 |
| Anlage 8: | Schaltplan Teil Powerplatine | 48 |

Anlage 1:



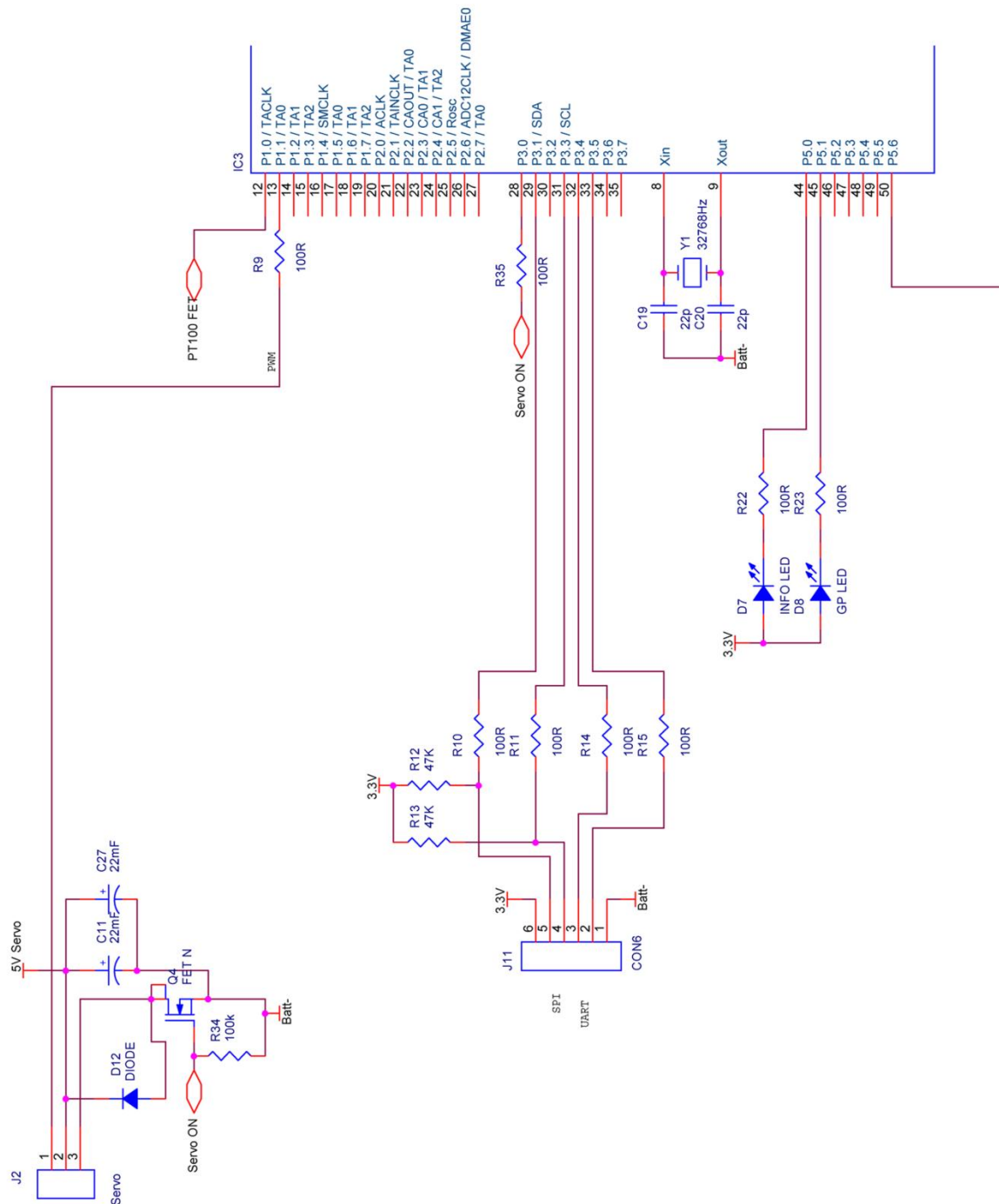
Programmablaufplan

Anlage 2:



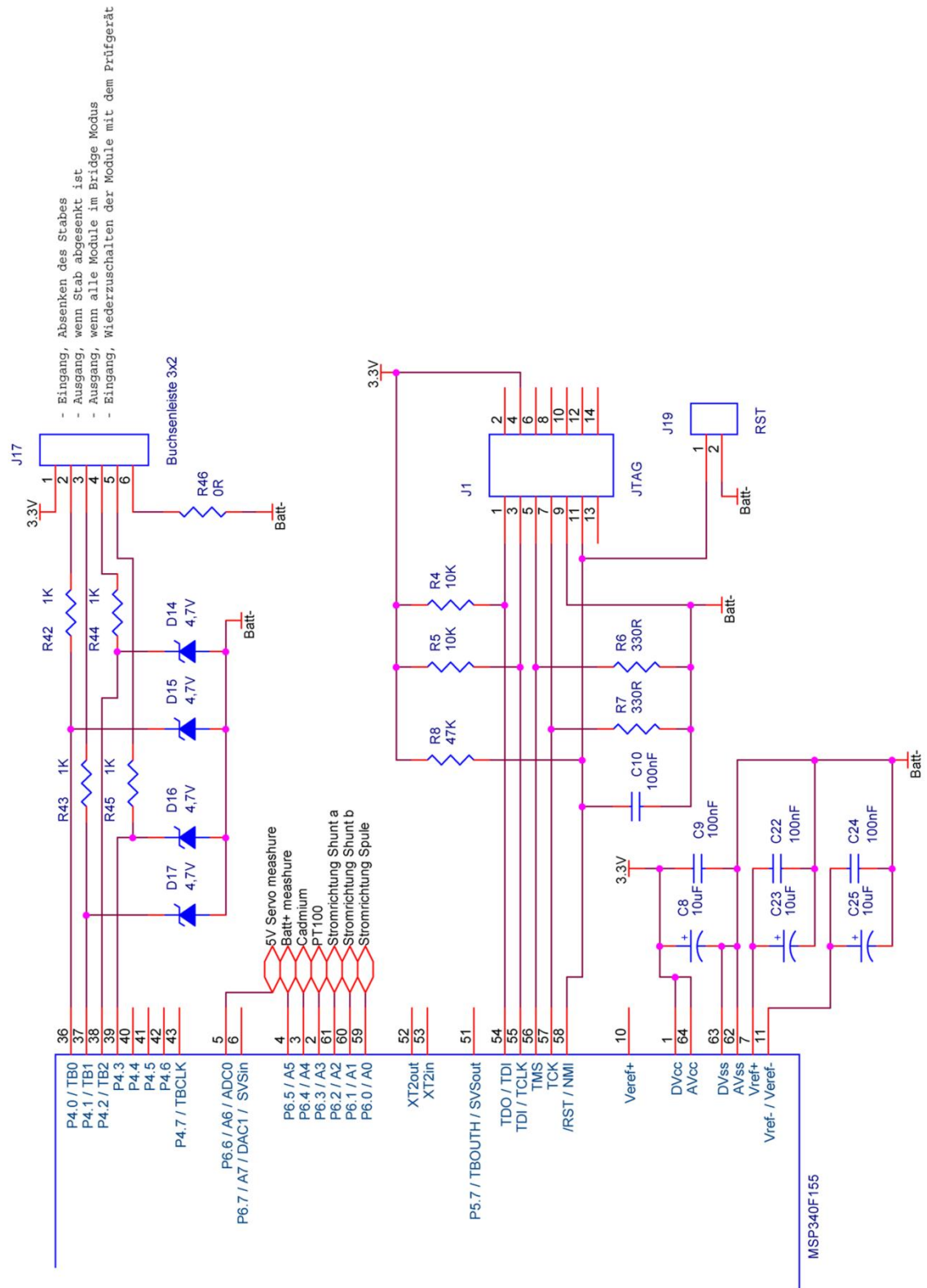
Spannungsversorgung

Anlage 3:



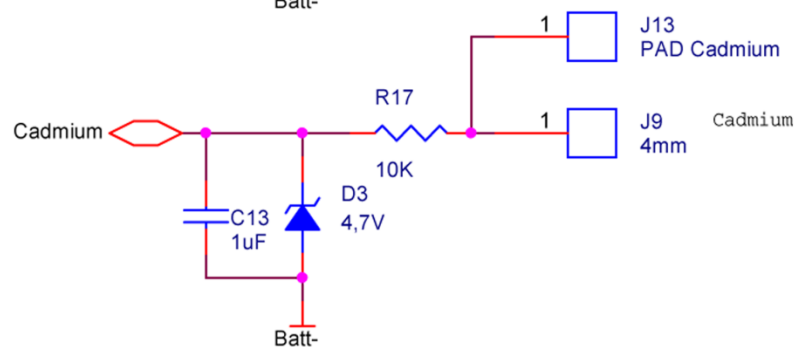
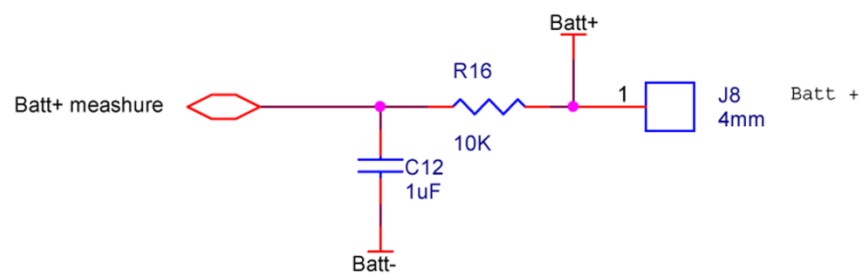
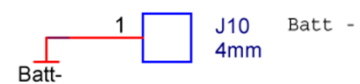
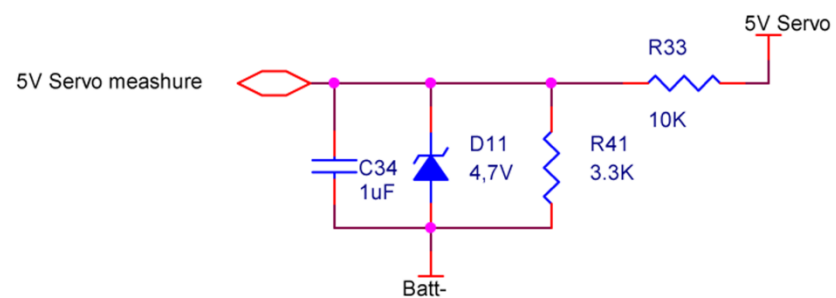
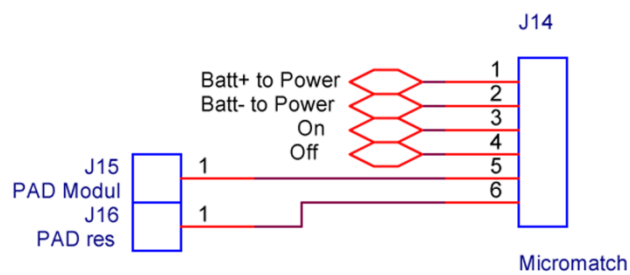
Servosteuern, UART, LED

Anlage 4:



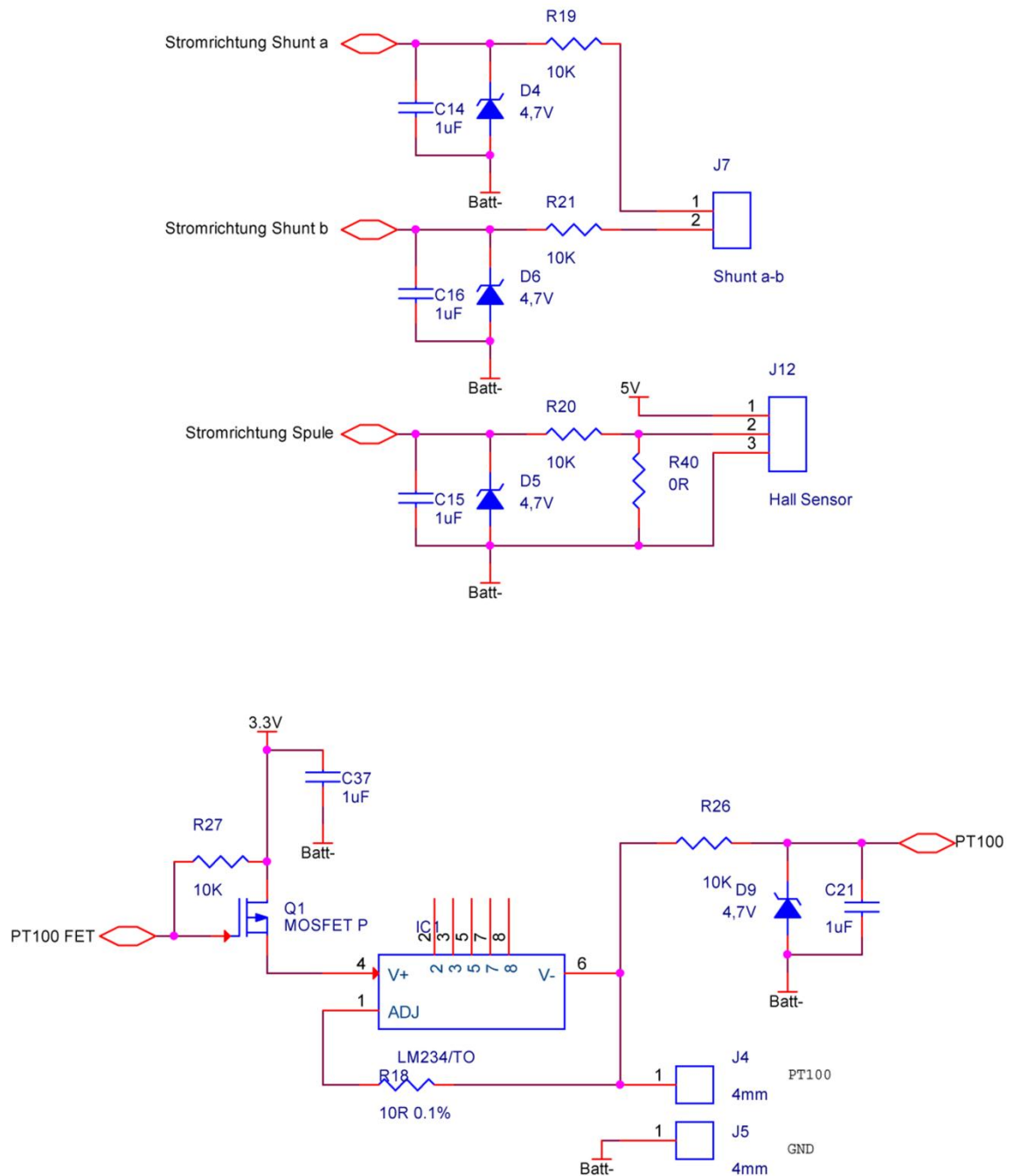
Schnittstellen, Messeingänge

Anlage 5:



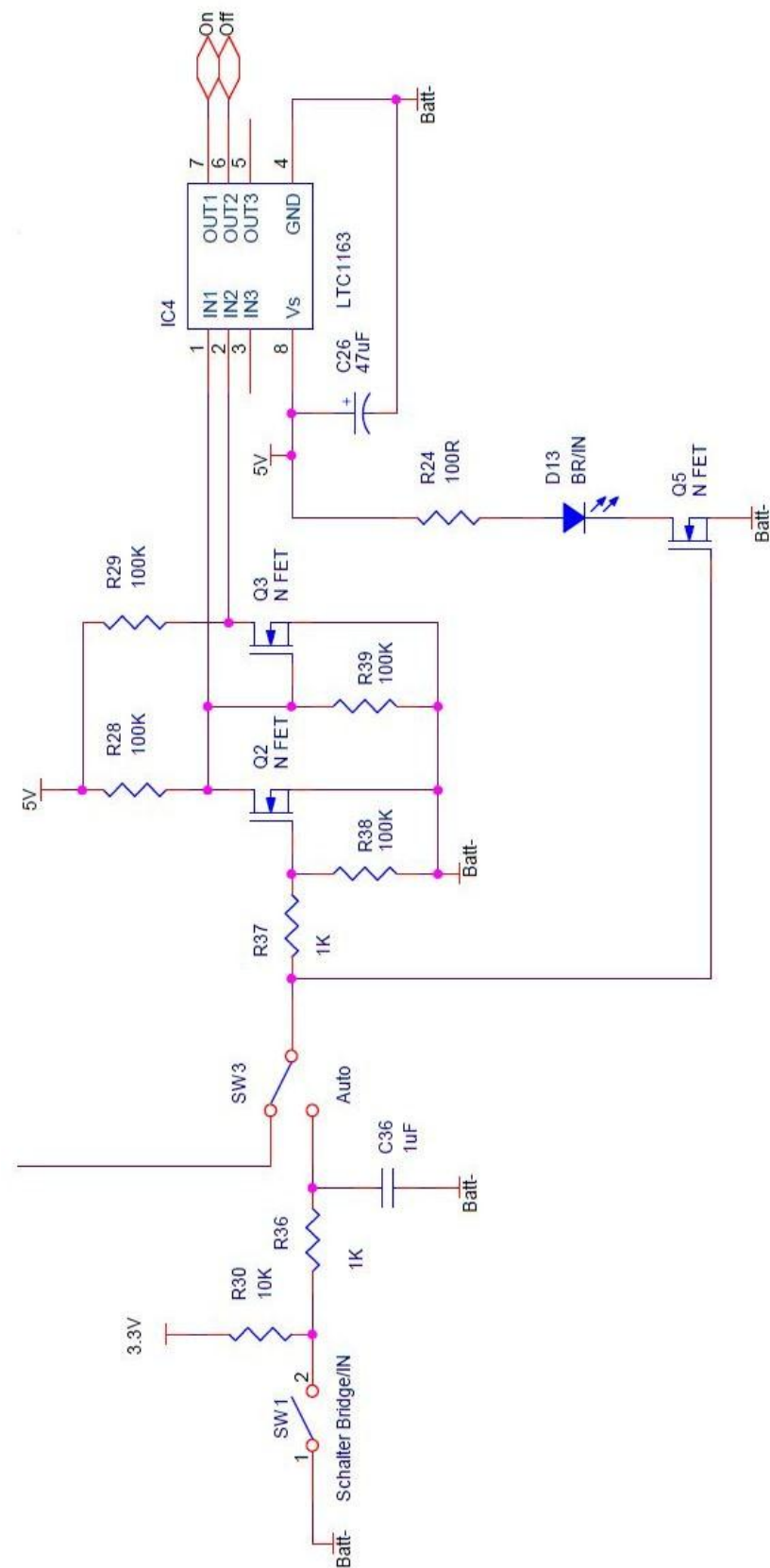
Verbindung zu Powerplatine, Messeingänge

Anlage 6:



Strom- und Temperaturmessung

Anlage 7:



MOSFET Treiber

Anlagen



Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 01.03.2012

.....

Philipp Kempe